



ANDRÉ FILIPE QUENDERA MAURÍCIO

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências

Militares Navais, na especialidade de Marinha



**Alfeite
2015**



ESCOLA NAVAL

talante e bi-faire



ANDRÉ FILIPE QUENDERA MAURÍCIO

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares

Navais, na especialidade de Marinha

Orientação: CMG João Paulo Ramalho Marreiros

O Aluno Mestrando

O Orientador

André Filipe Quendera Maurício

João Paulo Ramalho Marreiros

Alfeite
2015

Epígrafe

“If you want to succeed you should strike out on new paths, rather than travel the worn paths of accepted success”

John D. Rockefeller

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos, por serem um modelo de coragem e pelo apoio incondicional e incentivo demonstrados, sempre que foi necessário, durante o meu percurso na Escola Naval.

Agradecimentos

As minhas primeiras palavras de gratidão dirigem-se ao meu orientador, Comandante Ramalho Marreiros, por todo o apoio prestado e demonstrado durante a realização da dissertação, em resposta a qualquer solicitação da minha parte, por toda a disponibilidade, incentivo, conhecimento e entusiasmo pela área em questão.

Ao comando, oficiais e guarnição do N.R.P. "Bartolomeu Dias", que durante o estágio de embarque, sempre me apoiaram e mostraram-se disponíveis para auxiliar, mostrando-me uma outra perspectiva sobre o tema desta dissertação, voltado para o ambiente tático e militar naval.

Aos Aspirantes do meu curso VALM José Mendes Cabeçadas Júnior, pela entreaajuda, cooperação, dedicação e amizade, presentes em todos os momentos, durante a permanência na Escola Naval. *“Contra Ventos e Tormentas, Unidos Venceremos!”*.

Resumo

Com uma grande envolvente a nível mundial, o rápido desenvolvimento e aumento da tecnologia na última década, levou os sistemas de navegação por satélite a imporem-se cada vez mais no mercado internacional, mais propriamente para uso civil, face às necessidades de posicionamento e referência de tempo nas mais diversas áreas de atividade. Devido a isso, os Estados detentores destes sistemas têm-se empenhado em aumentar e fortalecer os seus serviços, de forma a garantir um elevado grau de disponibilidade e rigor.

No âmbito militar, é expectável que continue o ritmo de desenvolvimento, que venham a colmatar exíguas falhas, a fim de utilizá-los ao máximo das suas capacidades operacionais, nomeadamente em sistemas de armas guiados, capacidades *anti-jamming*, ou ainda, na monitorização de panorama para fins estratégicos e táticos. No sector marítimo é um instrumento útil e fundamental na maioria das novas aplicações criadas para a navegação e que permitem, para além de acompanhar e identificar navios, proporcionar ajuda aos centros de busca e salvamento, no âmbito da Convenção SOLAS (*Safety Of Life At Sea*).

A vulgaridade com que se utiliza atualmente e a rapidez com que se desenvolveu o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), deixa passar despercebido o intenso trabalho de investigação que foi sendo realizado desde o último século. Para conhecer o GNSS, as suas capacidades e tendências de desenvolvimento futuro é necessário refletir sobre o passado e conhecer os detalhes dos sistemas que o compõem.

Esta dissertação assenta, essencialmente, numa parte descritiva de todos os sistemas até agora criados, como são compostos e a forma como providenciam os serviços de posicionamento. Para além da componente descritiva, este trabalho também contém uma componente de programação e análise de dados, através da criação de um programa para o processamento de dados GNSS em modo cinemático, com aplicação a trabalhos em curso no âmbito de projetos de investigação da Escola Naval.

Palavras-chave

GNSS, GPS Toolkit, Navegação, Posicionamento, Tempo

Abstract

With a large global wraparound, the fast development and improved technology in the last decade, led the satellite navigation systems increasingly impose themselves in the international markets, more specifically for civil use, to face the positioning demands and time reference in wide activity areas. Because of this, the States who detain these systems have been committed to increase and strengthen their services, in order to provide them with a high degree of availability and accuracy.

In the military context, it's expected which continue the development rhythm, to fill gaps, in order to use them on maximum of their operational and unique capabilities, particularly in weapons guidance systems, anti-jamming capabilities, or, in the monitoring of the picture for strategic and tactical purposes. In the maritime sector, it is a useful and fundamental tool in most of the new applications created for the navigation and that allow, in addition to the monitored and identify ships, assistance to search and rescue centers, in scope of the SOLAS (Safety Of Life At Sea) Convention.

The vulgarity with that it's currently used and the quickness with which the GNSS (Global Navigation Satellite System) was developed, let pass unnoticed the intense research work that was being carried out since the last century. To get to know the GNSS, their capabilities and trends of future development it is necessary to reflect on the past and know details of its systems components.

This dissertation is based, essentially, in a descriptive part of all systems created until now, how they are composed and how they provide the positioning services. In addition to the descriptive part, this work also contains a programming and data analysis component, through the creation of a program for the GNSS data processing in kinematic mode, with application in ongoing works of research projects of the Escola Naval.

Keywords

GNSS, GPS Toolkit, Navigation, Positioning, Time

Índice

Epígrafe	iii
Dedicatória.....	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Palavras-chave	ix
Abstract.....	xi
Keywords.....	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xxi
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura.....	4
Capítulo 2. <i>Global Navigation Satellite System</i>	7
2.1. Conceitos Gerais.....	7
2.2. Predecessores do GNSS.....	10
2.3. Segmento Espacial.....	12
2.4. Segmento de Controlo	13
2.5. Segmento de Utilizador	14
2.6. Sinais transmitidos	15
2.7. Cálculo para posição do recetor	17
2.8. Fontes de erro relevantes	20
2.9. Sistemas de referência geodésica	23
2.10. Interoperabilidade.....	27
Capítulo 3. <i>Global Positioning System</i>	29

3.1. Segmento Espacial.....	29
3.2. Segmento de Controlo	31
3.3. Segmento de Utilizador	32
3.4. Futuro e Evolução.....	36
Capítulo 4. <i>GLobalnaya NAvigationnaya Sputnikovaya Sistema</i>	41
4.1. Segmento Espacial.....	41
4.2. Segmento de Controlo	43
4.3. Segmento de Utilizador	44
4.4. Futuro e Evolução.....	48
Capítulo 5. <i>Galileo</i>	51
5.1. Segmento Espacial.....	51
5.2. Segmento de Controlo	53
5.3. Segmento de Utilizador	53
5.4. Futuro e Evolução.....	58
Capítulo 6. <i>BeiDou</i>	61
6.1. Segmento Espacial.....	61
6.2. Segmento de Controlo	63
6.3. Segmento de Utilizador	64
6.4. Futuro e Evolução.....	68
Capítulo 7. <i>Regional Navigation Satellite System</i>	71
7.1. <i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>	71
7.2. <i>Quasi-Zenith Satellite System</i>	74
Capítulo 8. <i>Satellite Based Augmentation System</i>	77
8.1. <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>	77
8.2. <i>Wide Area Augmentation System</i>	79
8.3. <i>MTSAT Satellite Augmentation System</i>	81
8.4. <i>System for Differential Corrections and Monitoring</i>	83
8.5. <i>GPS Aided Geosynchronous Augmented Navigation System</i>	84
8.6. <i>Satellite Navigation Aided System</i>	85
Capítulo 9. <i>Processamento de Dados GNSS</i>	87
9.1. <i>Dados GNSS</i>	87
9.2. <i>GPSTk</i>	88
9.3. <i>Tratamento de dados</i>	88

9.4. Resultados Obtidos	89
Capítulo 10. Considerações Finais	97
10.1. Conclusões	98
10.2. Recomendações	99
Bibliografia.....	101
Anexo A. Satélites de navegação enviados para a órbita.....	1
A.1. Sistema GPS.....	1
A.2. Sistema GLONASS	5
A.3. Sistema Galileo	10
A.4. Sistema BeiDou	11
A.5. Sistema INRSS.....	13
A.6. Sistema QZSS.....	14
A.7. Sistema EGNOS.....	14
A.8. Sistema WAAS	15
A.9. Sistema MSAS.....	15
A.10. Sistema SDCM	15
A.11. Sistema GAGAN	16
A.12. Resumo satélites de navegação globais e regionais	16
Anexo B. Notas sobre o GPS Toolkit	1
B.1. O que é o GPSTk?	1
B.2. Porque o GPSTk?	1
B.3. Documentação e fontes de informação do GPSTk	2
B.4. <i>Download</i> e instalação para <i>MS Windows</i>	2
B.5. Desenvolver um projeto em C++ utilizando os ficheiros GPSTk pré-compilados.....	3
B.6. Desenvolver um projeto do GPSTk em <i>MS Windows</i>	7
B.7. Instalação do <i>Regex</i> para <i>MS VC++</i>	8
B.8. <i>Download CMake</i> para <i>MS VC++</i>	9
B.9. <i>Download</i> e instalação do <i>Gnuplot</i> para <i>MS VC++</i>	10
Anexo C. Código de processamento de dados GNSS.....	1
C.1. Código em C++ com recurso ao GPSTk	1
C.2. Ficheiro de Configuração.....	7
C.3. Código do <i>Gnuplot</i>	9
Anexo D. Fontes de informação sobre o GNSS.....	1

D.1. GNSS	1
D.2. GPS.....	1
D.3. GLONASS.....	2
D.4. Galileo.....	2
D.5. BeiDou	3
D.6. IRNSS.....	3
D.7. QZSS.....	3

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Processo de obtenção de posição num recetor genérico GNSS.....	14
Figura 2.2 – Erros relevantes, associados à propagação do sinal GNSS.....	20
Figura 2.3 – Interoperabilidade a nível de utilização da banda de radiofrequências.	28
Figura 9.1 – Dispersão da altitude obtida por GPS e GPS+GLONASS em função do tempo.....	90
Figura 9.2 – Posições geográficas obtidas por GPS e GPS+GLONASS.	90
Figura 9.3 – Dispersão espacial das posições geográficas em função da altitude obtidas por GPS e GPS+GLONASS.....	91
Figura 9.4 – Diferença de posicionamento com coordenadas NEU (<i>North East Up</i>) GPS e GPS+GLONASS.....	92
Figura 9.5 – Dispersão da altitude obtida por GPS em função do tempo e da agitação marítima.	93
Figura 9.6 – Posições geográficas obtidas por GPS durante a trajetória percorrida pelo navio. 94	
Figura 9.7 – Dispersão espacial das posições geográficas em função da altitude e da agitação marítima durante a trajetória obtidas por GPS.	95

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Descrição do sistema de referência geodésico americano utilizado pelo GPS.	24
Tabela 2.2 – Descrição do sistema de referência geodésico russo utilizado pelo GLONASS.	25
Tabela 2.3 – Descrição do sistema de referência geodésico europeu utilizado pelo Galileo.....	26
Tabela 2.4 – Descrição do sistema de referência geodésico chinês utilizado pelo BeiDou.....	27
Tabela 3.1 – Características do sinal L1 GPS.....	34
Tabela 3.2 – Características do sinal L2 GPS.....	35
Tabela 3.3 – Características do sinal L5 GPS.....	35
Tabela 4.1 – Características do sinal G1 GLONASS.	45
Tabela 4.2 – Características do sinal G2 GLONASS.	46
Tabela 4.3 – Características do sinal G3 GLONASS.	46
Tabela 5.1 – Características do sinal E1 Galileo.	56
Tabela 5.2 – Características do sinal E6 Galileo.	56
Tabela 5.3 – Características do sinal E5 Galileo.	57
Tabela 6.1 – Características dos sinais da fase I do projeto BeiDou.....	65
Tabela 6.2 – Características do sinal B1 BeiDou.	66
Tabela 6.3 – Características do sinal B2 BeiDou.	66
Tabela 6.4 – Características do sinal B3 BeiDou.	67
Tabela 7.1 – Características dos sinais IRNSS.	73
Tabela 7.2 – Características dos sinais QZSS.....	76
Tabela 9.1 – Estatística de medidas de exatidão de posicionamento para estação estática.	92
Tabela A.1 – Situação atual dos satélites GPS.	1
Tabela A.2 – Locais de lançamento satélites GPS.....	1
Tabela A.3 – Satélites <i>Block I</i> GPS.	2
Tabela A.4 – Satélites <i>Block II</i> GPS.....	2
Tabela A.5 – Satélites <i>Block IIA</i> GPS.	3
Tabela A.6 – Satélites <i>Block IIR</i> GPS.	3
Tabela A.7 – Satélites <i>Block IIR-M</i> GPS.....	4
Tabela A.8 – Satélites <i>Block IIF</i> GPS.	4
Tabela A.9 – Situação atual dos satélites GLONASS.....	5
Tabela A.10 – Locais de lançamento satélites GLONASS.	5
Tabela A.11 – Satélites <i>Uragan Block I</i> GLONASS.	6
Tabela A.12 – Satélites <i>Uragan Block I</i> GLONASS.	6

Tabela A.13 – Satélites <i>Uragan Block IIb</i> GLONASS.....	7
Tabela A.14 – Satélites <i>Uragan Block IIv</i> GLONASS.	8
Tabela A.15 – Satélites <i>Uragan M</i> GLONASS.	10
Tabela A.16 – Satélites <i>Uragan KI</i> GLONASS.....	10
Tabela A.17 – Situação atual dos satélites Galileo.	10
Tabela A.18 – Locais de lançamento satélites Galileo.	10
Tabela A.19 – Satélites <i>Giove</i> Galileo.....	11
Tabela A.20 – Satélites <i>Galileo IOV</i> Galileo.....	11
Tabela A.21 – Satélites <i>Galileo FOC</i> Galileo.	11
Tabela A.22 – Situação atual dos satélites BeiDou.	11
Tabela A.23 – Locais de lançamento satélites BeiDou.....	12
Tabela A.24 – Satélites <i>BeiDou-1</i> BeiDou.....	12
Tabela A.25 – Satélites <i>BeiDou-2</i> BeiDou.....	12
Tabela A.26 – Satélites <i>BeiDou-3</i> BeiDou.....	13
Tabela A.27 – Situação atual dos satélites IRNSS.	13
Tabela A.28 – Locais de lançamento satélites IRNSS.....	13
Tabela A.29 – Satélites <i>IRNSS-1</i> IRNSS.....	13
Tabela A.30 – Situação atual dos satélites QZSS.	14
Tabela A.31 – Locais de lançamento satélites QZSS.	14
Tabela A.32 – Satélites <i>QZS1</i> QZSS.....	14
Tabela A.33 – Satélites EGNOS.	14
Tabela A.34 – Satélites WAAS.....	15
Tabela A.35 – Satélites MSAS.....	15
Tabela A.36 – Satélites SDCM.	15
Tabela A.37 – Satélites GAGAN.	16
Tabela A.38 – Tabela resumo dos satélites de navegação globais e regionais.....	16

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

A/S	<i>Anti-Spoofing</i>
AltBOC	<i>Alternated BOC</i>
ARNS	<i>Aeronautical Radio Navigation Service</i>
ASBC	<i>Advanced Space Business Corporation</i>
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuits</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
BDT	<i>BeiDou Time</i>
BMCS	<i>Backup Master Control Station</i>
BOC	<i>Binary Offset Carrier</i>
BPSK	<i>Binary Shift Phase Keying</i>
C/A	<i>Coarse/Acquisition</i>
CBOC	<i>Composite BOC</i>
CC-M	<i>Central Clock</i>
CCF	<i>Central Control Facility</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CGCS2000	<i>China Geodetic Coordinate System 2000</i>
CHA	<i>Channel High Accuracy</i>
CPF	<i>Central Processing Facility</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
CSA	<i>Channel Standard Accuracy</i>
CTS	<i>Command and Tracking Station</i>
DASS	<i>Distress Alerting Satellite System</i>
DGCA	<i>Director General of Civil Aviation</i>
DGNSS	<i>Differential GNSS</i>

DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DRMS	<i>Distance Root Mean Squared</i>
ECEF	<i>Earth Centered Earth Fixed</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EGEP	<i>European Global Navigation Satellite System Evolution Programme</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EWAN	<i>EGNOS Wide Area Network</i>
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FOC	<i>Full Operational Capability</i>
FOP	<i>Final Operational Phase</i>
GA	<i>Ground Antenna</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation System</i>
GCC	<i>Galileo Control Centre</i>
GCS	<i>Galileo Control System</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GLONASS	<i>GLobalnaya NAvigationnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GLONASST	<i>GLONASS Time</i>
GMS	<i>Galileo Mission System</i>
GNS	<i>Global Navigation System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPST	<i>GPS Time</i>

GRSP	<i>Galileo Geodetic Reference Service Provider</i>
GSA	<i>European Global Navigation Satellite System Agency</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSO	<i>Geosynchronous Orbit</i>
GSS	<i>Galileo Sensor Station</i>
GST	<i>Galileo System Time</i>
GPSTk	<i>GPS Toolkit</i>
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>
GUS	<i>Ground Uplink Stations</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
HP	<i>High Precision</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ICG	<i>International Committee on Global Navigation Satellite Systems</i>
IGEO	<i>Instituto Geográfico Português</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i>
ILRS	<i>IRNSS Laser Ranging Station</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
INC	<i>IRNSS Navigation Centre</i>
INLUS	<i>Indian Land Uplink Station</i>
INMCC	<i>Indian Master Control Center</i>
INRES	<i>Indian Reference Stations</i>
IOC	<i>Initial Operational Capability</i>
IOV	<i>In-Orbit Validation</i>
IRCDR	<i>IRNSS CDMA Ranging</i>

IRDCN	<i>IRNSS Data Communication Network</i>
IRIMS	<i>IRNSS Range and Integrity Monitoring</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
IRNWT	<i>IRNSS Timing Centre</i>
IRTTC	<i>IRNSS Telemetry, Tracking and Command & Uplinking</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
KNIT	<i>Coordination Scientific Information Centre</i>
MBOC	<i>Multiplexed BOC</i>
MCC	<i>Mission Control Centre</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
MEAG	<i>Mission Evolution Advisory Group</i>
MSAS	<i>MTSAT Satellite Augmentation System</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MEOSAR	<i>Medium Earth Orbit Search and Rescue</i>
MRS	<i>Monitor and Ranging Station</i>
MRSE	<i>Mean Radial Spherical Error</i>
MS	<i>Monitor Station</i>
MTSAT	<i>Multifunctional Transport SATellites</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSOC	<i>Naval Satellite Operations Center</i>

NAVSTAR	<i>Navigation Satellite with Time and Ranging</i>
NAVWAR	<i>Navigation Warfare</i>
NCSR	<i>Navigation, Communications and Search and Rescue</i>
NEU	<i>North East up</i>
NIMS	<i>Navy Ionospheric Monitoring System</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations</i>
NNSS	<i>Navy Navigation Satellite System</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via InterNet Protocol</i>
OCC	<i>Operational Control Centers</i>
OCS	<i>Operational Control Segment</i>
OD&TS	<i>Orbitography Determination and Time Synchronization</i>
OS	<i>Open Service</i>
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
PPP	<i>Precise Point Positioning</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PPSPS	<i>Precise Positioning Service Performance Standard</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PS	<i>Precision Service</i>
PVT	<i>Position, Velocity and Precise Time</i>
PZ-90	<i>Parametry Zemli 1990</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RIMS	<i>Ranging Integrity Monitoring Stations</i>
RINEX	<i>Receiver INdependent Exchange</i>

RNP	<i>Required Navigation. Performance</i>
RNSS	<i>Regional Navigation Satellite System</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
S/A	<i>Selective Availability</i>
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SCC	<i>System Control Centre</i>
SCC	<i>IRNSS Space Craft Control Centre</i>
SDCM	<i>System of Differential Correction and Monitoring</i>
SIS	<i>Signal-In-Space</i>
SISA	<i>Signal-in-Space Accuracy</i>
SISMA	<i>Signal-in-Space Monitored Accuracy</i>
SISNet	<i>Signal-In-Space and InterNet</i>
SLR	<i>Laser Range Station</i>
SoL	<i>Safety of Life Service</i>
SOLAS	<i>Safety Of Life At Sea</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNAS	<i>Satellite Navigation Augmentation System</i>
SP	<i>Standard Precision</i>
SPAC	<i>Satellite Positioning Research and Application Center</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
SPSPS	<i>Standard Positioning Service Performance Standard</i>
TAI	<i>Temps Atomic International</i>

TDS	<i>Technology Demonstration System</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TMS	<i>Time Management Station</i>
TT&C	<i>Telemetry, Tracking and Command</i>
ULS	<i>Uplink Station</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WAGE	<i>Wide Area GPS Enhancements</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i>
WMS	<i>WAAS Master Station</i>
WRS	<i>Wide-area Reference Stations</i>
WWRNS	<i>World-Wide Radionavigation System</i>

Capítulo 1. Introdução

O termo *Global Navigation Satellite System* (GNSS) foi pela primeira vez utilizado em 1991 pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), de forma a representar os sistemas de posicionamento por satélite com cobertura mundial (Siu, 2012).

Nos últimos anos assistiu-se à grande popularização dos serviços destes sistemas, sobretudo graças ao sistema desenvolvido pelos EUA, o *Global Positioning System* (GPS). Para além deste sistema, outros GNSS começaram a ser desenvolvidos e alguns estão em fase de implementação ou de projeto, tais como o *GLobalnaya NAvigationnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) da Federação Russa, o *Galileo* da União Europeia e ainda o *BeiDou* da República Popular da China (United Nations, 2010).

Em complemento ao GNSS, existem também sistemas de posicionamento por satélite de cobertura regional, o *Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS) e o *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS), os quais disponibilizam posicionamento, só para uma determinada área do planeta (United Nations, 2010). Existem ainda sistemas de aumento local da capacidade do GPS, como o EGNOS de cobertura Europeia e o WAAS que cobre o continente Norte-Americano, com outros em implementação, que visam melhorar o desempenho e a integridade de um mais GNSS.

O GNSS pode ser considerado como o avanço mais significativo alguma vez realizado, para o determinar da posição de um objeto à superfície da Terra. O seu impacto no desenvolvimento científico, tecnológico e económico foi enorme. Basta imaginar, o que seria hoje a nossa vida sem o GNSS, designadamente na navegação marítima. Esta evolução foi rápida e o ritmo de crescimento não abranda, face ao crescente aumento da capacidade e criação de novos sistemas, bem como a evolução de tecnologias associadas, que conduziram a uma diminuição dos custos dos aparelhos recetores dos sinais, e também a um aumento das suas capacidades.

1.1. Motivação

Os primeiros sistemas GNSS foram criados para fins militares, em termos de posicionamento preciso, provando ser indispensáveis nas atividades dos mesmos (terrestre, aérea e marítima) (Baijal & Arora, 2001).

A navegação por satélite no âmbito de missões militares em ambientes hostis é muito importante, nomeadamente em ações noturnas em território inimigo, muitas vezes pouco ou mal conhecido. Com o GNSS é possível determinar com exatidão o posicionamento das nossas forças, bem como das forças inimigas e dirigir o poder de fogo com precisão “cirúrgica”. O GNSS é um instrumento essencial nas operações, ao nível tático, uma valiosa fonte de informação no processo de tomada de decisão e de execução da mesma. (Baijal & Arora, 2001). Para além das funções referidas, permite ter uma capacidade adicional no acompanhamento e aquisição antecipada de alvos em atividades de *intelligence*, *surveillance* ou *reconnaissance*, utilizados para sistemas de aviso antecipado e sistemas de armas, para a condução de mísseis, reduzindo o tempo de prontidão (Saulay, 2010).

Os GNSS utilizados para a navegação marítima em navios militares ou civis, são especialmente importantes, nos vários tipos de navegação, oceânica, costeira, águas restritas ou mesmo na fase de atracação, para além de ser um instrumento que fornece serviços como o AIS ou alimenta a base de posicionamento de cartas eletrónicas de navegação (European Space Agency, 2003) (International Maritime Organization, 2002).

No entanto, estes sistemas são suscetíveis a sinais de *jamming*, a maior ameaça aquando da sua utilização, face ao surgimento de dispositivos capazes de interferir com as frequências utilizadas pelos satélites, podendo induzir à sua interrupção (Grimes, 2008a). É desta forma que os detetores destes sistemas de navegação, têm vindo a melhorar os sinais militares para que possam ter capacidades *anti-jamming* mais efetivas e fiáveis.

Reconhecida a importância do GNSS, e a vulgarização da sua utilização nas mais elementares aplicações de uso rotineiro, passa muitas vezes despercebida a complexidade e a sofisticação associada à elementar leitura da posição geográfica e da hora num recetor. Passaram 20 anos desde que o GPS foi considerado operacional e desde então assistiu-se a uma evolução tecnológica exponencial que importa analisar e estudar, com o objetivo de compreender o futuro e o impacto na navegação marítima, no âmbito da IMO (*Internacional Maritime Organization*) e nas operações navais, no âmbito NAVWAR (*Navigation Warfare*).

Este estudo poderá ser de utilidade para a investigação desenvolvida na Escola Naval, e vem na linha de uma tradição do estudo das técnicas e metodologias de navegação. Pretende-se desenvolver uma aplicação em computador, que permita calcular a posição de um objeto em movimento com dados brutos GNSS. Uma aplicação que seja suscetível de ser facilmente parametrizável, que possa ser usada para efeitos de instrução na Escola Naval e que se constitua como um embrião para estudos futuros.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação de mestrado é o de estudar, analisar, coligir e organizar informação relevante sobre o GNSS, enquadrando-a de forma a ser desenvolvida no futuro de um modo mais aprofundado na Escola Naval. Os objetivos específicos a atingir com esta dissertação são os seguintes:

- Aprofundar os conhecimentos sobre GNSS;
- Utilização desta para consulta, esclarecimento e possível utilização como recurso útil a nível bibliográfico no que concerne a este tema, nomeadamente nas unidades curriculares de Hidrografia e de Navegação;
- Processamento de dados GNSS em modo de posicionamento absoluto cinemático, com o desenvolvimento de uma aplicação em linguagem C++ e com recurso às rotinas de utilização livre do *GPS Toolkit* (GPSTk).

1.3. Metodologia

Pode-se definir a metodologia de investigação, como um processo de seleção da melhor estratégia no âmbito de uma investigação, da mesma forma que o método é entendido como um conjunto de operações realizadas, a fim de obter um ou mais objetivos, o qual dirige toda a investigação por detrás deste e permite selecionar e coordenar técnicas a usar (Grawitz, 1993).

As investigações podem assim ser conduzidas de acordo com duas abordagens, uma quantitativa e uma qualitativa, embora alguns autores vejam as diferenças entre ambas como algo vantajoso, daí a aplicação de uma abordagem mista, que se pode constituir como a única forma de aprofundar o conhecimento relacionado com o tema em estudo (Sousa & Baptista, 2011).

A investigação quantitativa é caracterizada como uma abordagem, na qual é necessário assumir situações, fenómenos ou acontecimentos que se pretendem estudar os quais possam ser traduzidos numericamente, ou seja, sempre que haja possibilidade, o investigador deve efetuar medições rigorosas e precisas do tipo quantitativo e formular matematicamente as observações e conclusões (Ribeiro, 2007). O seu principal objetivo é identificar e apresentar dados, indicadores e tendências observáveis, daí a sua utilização em áreas das ciências exatas (Sousa & Baptista, 2011).

A investigação qualitativa é descrita como uma abordagem, segundo a qual os investigadores se preocupam em compreender as perceções individuais do mundo, ou seja, realizam observações do tipo qualitativo, analisando um determinado fenómeno ou assunto, procurando o seu motivo, entre outros fatores (Ribeiro, 2007). O seu principal objetivo é a compreensão dos problemas e a análise de certas atividades.

Esta dissertação tem como base fundamental, segundo os autores descritos, um método misto, devido às opções metodológicas tomadas e métodos de recolha e análise de dados. É um estudo de carácter exploratório quanto ao tipo de abordagem, dada a natureza da informação obtida ser tratada, aquando do fim da investigação. Por outras palavras, qualitativa, como uma componente descritiva e aprofundada do tema GNSS, com recurso a uma pesquisa bibliográfica e documental abrangente e quantitativa, uma vez que se efetua a recolha de dados pós-processados GNSS, e após a sua análise, são apresentados de forma a diferenciá-los quanto ao seu campo de ação e utilidade.

1.4. Estrutura

Esta dissertação de mestrado é constituída por dez capítulos.

Capítulo 1 Composto por um texto introdutório, no qual é descrito o panorama em que se insere a tese, desde os objetivos propostos até às metodologias utilizadas.

Capítulo 2 Descrição do que é exatamente um GNSS; as várias partes constituintes da arquitetura do seu sistema, nomeadamente, o segmento espacial, de controlo e de utilizador; cálculos realizados para determinação da posição por um recetor e quais as fontes de erro associadas. Para além disso, é abordado o aparecimento destes sistemas de navegação por satélite, fazendo referência aos antecessores, terminando com o sistema de referência geodésica que cada um utiliza e a capacidade de serem interoperáveis.

Capítulo 3, 4, 5 e 6 São descritos de uma forma mais abrangente e detalhada, cada um dos sistemas de navegação global por satélite, GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, a arquitetura dos seus sistemas, desempenho a nível de posicionamento, configurações do sinal e o que se prevê a curto e médio prazo dado a forma como irão evoluir.

Capítulo 7 São apresentados, apesar de uma forma menos abrangente e discriminada, os sistemas de navegação regional por satélite IRNSS e QZSS, abordando respectivamente, tal como no capítulo anterior, a arquitetura do sistema, serviços ou performances, por exemplo, concluindo com a configuração que se prevê, com a evolução destes sistemas.

Capítulo 8 Detalhe do funcionamento dos sistemas complementares de aumento de capacidade GNSS, que permite melhorar os sistemas de navegação globais, a nível do sinal e serviços fornecidos, como se trata, por exemplo, do EGNOS ou do WAAS.

Capítulo 9 Trata da parte do desenvolvimento, que inclui o processamento de dados GNSS pós-processados, com recurso ao programa MS Visual C++, permitindo observar e analisar os resultados obtidos, quer para uma estação estática, quer em movimento, onde se irá verificar as discrepâncias e erros associados à deslocação de um objeto durante a receção e computadorização do sinal. Este será o início do desenvolvimento de um sistema de posicionamento com dados pós-processados para a Escola Naval.

Capítulo 10 Apresentação das conclusões após análise dos resultados, feitas recomendações para o passo seguinte de desenvolvimento deste projeto e as suas possíveis melhorias.

Capítulo 2. *Global Navigation Satellite System*

2.1. Conceitos Gerais

O GNSS (do inglês, *Global Navigation Satellite System*) permite determinar o posicionamento geográfico de um objeto na superfície da Terra, através de satélites artificiais especialmente concebidos para o efeito (Seeber, 2003).

O GNSS é composto por vários sistemas “independentes” desenvolvidos por grandes potências económicas mundiais, que permitem a interoperabilidade entre si. Estes sistemas partilham também do mesmo princípio geral de funcionamento, em que o processo de obtenção da posição apresenta semelhanças ao que se designa genericamente por trilateração, que tem por base a medição da distância (Hegarty & Chatre, 2008).

Para determinar a posição, o recetor GNSS necessita, no mínimo, de quatro satélites simultaneamente visíveis por uma antena (Seeber, 2003). O sinal transmitido por cada satélite permite determinar o intervalo de tempo de propagação, a partir do qual se calcula, o tempo horário e a posição geográfica com um elevado grau de rigor, quando comparado com outros métodos de posicionamento, entre a dezena de metros e alguns centímetros, dependendo da sofisticação dos recetores e dos métodos de processamento de dados (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

A era do posicionamento espacial começou aquando do lançamento a 4 de Outubro de 1957 do primeiro satélite artificial, o *Sputnik I* (Seeber, 2003). Este evento possibilitou enormes avanços tecnológicos, sendo uma viragem na vida da humanidade, com implicação nos sistemas de posicionamento. O Homem passou olhar para o céu para se posicionar na Terra, tal como acontecia na antiguidade, mas agora observa-o com um nível de qualidade e disponibilidade muito superior. Após o lançamento dos primeiros satélites artificiais de navegação que se seguiram ao *Sputnik*, o *Department of Defense* (DoD) dos EUA, em 1973 lançou as bases para o projeto de criação de um sistema global de posicionamento por satélite com a criação do GPS (Federal Aviation Administration, 2014b). O objetivo principal foi a utilização para fins militares, apesar de nos dias de hoje, estar disponível para o uso civil em geral, sem encargos para o utilizador, bastando possuir apenas um recetor, como os que existem nos carros, telefones, relógios e dispositivos próprios que podem ser adquiridos a baixo custo (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

Com o sucesso do GPS, outros países com potencial científico e económico, lançaram-se na criação de sistemas de posicionamento por satélite, reduzindo ou eliminando a dependência do sistema americano ou melhorando o desempenho em determinadas regiões (Someswar, Rao, & Chigurukota, 2013). De uma forma geral, todos os sistemas de satélites têm uma arquitetura semelhante e a mesma função, a de permitir determinar uma solução de navegação de um objeto à superfície da Terra ou no espaço em seu redor (Seeber, 2003). A solução de navegação é comportada pelo vetor posição e pelo vetor velocidade, ambos referidos a uma determinada hora de observação, com o maior rigor possível. Esta solução designa-se abreviadamente por PVT (*Position, Velocity and Precise Time*). A arquitetura de um sistema de satélites é composta pelos seguintes segmentos (United Nations, 2010):

- **Segmento espacial:** Consiste numa constelação de satélites, devidamente posicionados em órbitas pré-definidas, que transmite sinais de rádio para os utilizadores;
- **Segmento de controlo:** Consiste numa rede de estações terrestres, com a função de fazer o seguimento dos satélites, monitorizar a qualidade dos sinais e da informação transmitida, analisar o desempenho, enviar dados e comandar os satélites;
- **Segmento do utilizador:** Consiste num sistema de receção (antena e recetor), que permite a receção dos sinais, modulação dos dados e o cálculo da solução de navegação.

Os sistemas de posicionamento por satélite, podem diferenciar-se consoante a sua capacidade de cobertura de área a (United Nations, 2010):

- Satélites de navegação de cobertura global, designados pelo nome *Global Navigation Satellite System* (GNSS), já referidos;
- Satélites de navegação de cobertura regional, designados por *Regional Navigation Satellite System* (RNSS), os quais não possuem a capacidade de cobertura global, estando a sua área de cobertura restringida a regiões limitadas do planeta, para onde foram especialmente concebidos, de forma a permitir um melhor desempenho e menor dependência dos GNSS.

Alguns sistemas de navegação de satélite foram concebidos para monitorizar e melhorar o desempenho de GNSS em determinadas áreas. Estes sistemas designados por *Satellite Based Augmentation System* (SBAS), são constituídos por estações de referência, que monitorizam os sinais dos satélites e calculam parâmetros de correção que podem ser usados para melhorar a qualidade da solução de navegação em determinadas regiões (United Nations, 2010). Essas correções são enviadas para satélites que os transmitem para os recetores GNSS, com capacidade SBAS.

Para além da conceção e aplicação para uso militar, o GNSS tem uma ampla utilização de âmbito civil tais como na topografia e cartografia, na navegação terrestre, marítima, aérea e espacial (United Nations, 2004). O GNSS permite superar limitações das técnicas baseadas em sistemas de posicionamento terrestres, com maior rigor, disponibilidade e economia, com aplicação, por exemplo, nas seguintes áreas (United Nations, 2012):

- Nos levantamentos hidrográficos e topográficos, torna-os substancialmente mais eficientes e de melhor qualidade;
- Nas comunicações e informática, permite sincronizar estações distantes;
- Na engenharia civil é aplicado no acompanhamento de obras e monitorização do estado de estruturas;
- Na natureza, monitoriza a vida dos animais e protecção ambiental;
- Na redução do impacto de catástrofes naturais contribui para a sua prevenção, avaliação do impacto e organização do apoio às populações, quando podem ou não ocorrer.

O advento do GNSS veio revolucionar a execução de um amplo conjunto de atividades, tornando-as mais eficientes, uma vasta gama de aplicações e um melhor conhecimento do mundo que nos rodeia (Someswar, Rao, & Chigurukota, 2013). O desenvolvimento e aplicação do GNSS continua a ser uma fonte de investigação transversal a praticamente todas as áreas do saber e continua em permanente evolução, o que não convém descurar.

2.2. Predecessores do GNSS

Os sistemas de navegação por satélite só se desenvolveram com o advento da navegação eletrónica dos sistemas de radioposicionamento, Decca, LORAN (*Long Range Navigation*), GEE (derivado de *Grid*, dado utilizar linhas de grade), Omega, Trinsponder e outros que utilizavam transmissores terrestres de ondas rádio em vez de satélites (Stansell, 1978).

A determinação das linhas de posição baseava-se na medição do atraso entre a emissão e a receção do sinal transmitido por impulsos de rádio a partir de uma estação principal, conhecendo as distâncias ou de diferenças de distâncias entre estações fixas, o que permitia determinar a posição de uma estação móvel, desde que existisse um número mínimo de linhas de posição independentes a partir dessas estações (Danchik, 1998).

Com o advento da era espacial, desde logo se imaginou a possibilidade de posicionamento a partir de satélites (Stansell, 1978). Para que isso se concretizasse foi necessário resolver um conjunto de problemas técnicos e científicos, que passo a enumerar:

- Transmissão da posição de um satélite em órbita, em perpétuo movimento;
- Conceção do sinal a ser transmitido face às limitações de potência;
- Determinação da posição;
- Garantia de uma cobertura mundial sempre disponível;

Estes problemas foram sendo resolvidos com o progresso da ciência, a dedicação e a genialidade de muitos homens e de equipas técnicas bem organizadas (Pisacane, 1998). O primeiro sistema de posicionamento por satélite operacional foi o *Transit*, o qual é descrito na próxima secção e cuja experiência adquirida na conceção e utilização em muito influenciou o desenvolvimento do primeiro GNSS, o GPS (Guier & Weiffenbach, 1998).

2.2.1. *Transit– U.S. Navy Navigation Satellite System*

Na década de 1960, é implementado pela *U.S. Navy*, o primeiro sistema de posicionamento por satélite para efeitos militares, o *Transit* (Danchik, 1998). Este sistema funcionava com base no seguimento do efeito Doppler. O controlo e determinação da

posição dos satélites em órbita baseavam-se na observação do efeito Doppler (U.S. Navy, 1967). Deste modo, o problema da determinação da posição de um objeto na Terra, passava por solucionar o problema inverso, uma vez conhecida a posição do satélite, possibilitando a utilização dos dados Doppler poderiam ser utilizados para determinar a posição desconhecida de um observador (Encyclopedia Astronautica, *s.d.b*).

O *Transit* foi largamente utilizado para navegação marítima e contribuiu para salientar a importância e a vantagem dos satélites relativamente aos métodos de navegação baseados em estações terrestres em pleno ambiente de guerra fria, entre os EUA e a extinta União Soviética (Pisacane, 1998). Estabeleceu-se uma rede de estações de monitorização de satélites, de cobertura global, incitando à criação de um grande número de patentes em engenharia espacial, tecnologia e ciência.

O segmento espacial do sistema teve origem nos satélites de 1ª geração, concluídos após o financiamento inicial do programa (Danchik, 1998). Com o aperfeiçoamento e atualizações deste segmento, passaram de satélites esféricos para satélites quase cilíndricos. Os satélites da 4ª geração, utilizaram pela primeira vez, duas frequências, corrigindo assim os erros devido à propagação na ionosfera (Danchik, 1998). O início dos protótipos de um veículo espacial operacional, tal como os dos dias de hoje, começou em 1964, através do desenvolvimento de outras tecnologias, passando a dispor de um propulsor de energia solar ao invés da nuclear tendo maior fiabilidade e tempo de vida útil e estando à disposição do público geral (Pisacane, 1998). As órbitas eram geralmente polares, ou seja, a cerca de 1100 km de altitudes e durante todo o período de serviço do sistema, quatro gerações de frequências padrão de cézio e três de hidrogénio foram experimentadas (Stansell, 1978).

O sistema de operações e controlo *Transit* era operado pela *Naval Satellite Operations Center* (NAVSOC) que dispunha de estações que faziam a monitorização e reuniam os dados Doppler, os quais eram armazenados, para serem continuamente retransmitidos para os satélites, com as efemérides previstas para cada um deles e, posteriormente, estas eram transmitidas para os utilizadores (Pisacane, 1998) (Danchik, 1998).

Os serviços de navegação do sistema *Transit*, apesar de terem sido encerrados em 1996, no ano seguinte, a restante constelação passou para o *Navy Ionospheric Monitoring System* (NIMS), que utilizou o sistema para computadorização da tomografia da ionosfera,

para determinar o perfil de elétrons livres aí existentes, auxiliando em possíveis cálculos de erros no posicionamento, resultantes da camada ionosférica (Encyclopedia Astronautica, *s.d.b*).

O segmento de utilizador do sistema, baseava-se num princípio em que a posição do recetor poderia ser determinada com uma única passagem de um satélite, com o efeito de Doppler por um período de 10 a 16 minutos (Stansell, 1978). Por conseguinte, os recetores mediam a evolução temporal do efeito de Doppler com uma correção da refração e guardavam as efemérides orbitais, da mesma forma que o satélite que passava sobre estes, permitindo ao utilizador calcular a posição inicial, com exatidão dentro das poucas centenas de metros, mas apenas a cada 35 a 100 minutos (Stansell, 1978). Esta informação de navegação seria obtida com recurso a instrumentos de baixa movimentação, como os navios, porém não permitia adquirir velocidade (Danchik, 1998).

O *Transit Navigations System* ou *Navy Navigation Satellite System* (NNSS) durante os seus 32 anos de operação (1964-1996) forneceu navegação global precisa e fiável à *U.S. Navy* e à comunidade civil, tendo sido melhorado progressivamente, e para além disso, contribuiu para muitos avanços tecnológicos na área aeroespacial (Danchik, 1998).

2.3. Segmento Espacial

Um satélite de navegação é um objeto artificial que fornece e providencia autonomamente a posição geográfica na Terra, através de sinais de radionavegação transmitidos para o segmento de controlo, por sensores controlados por relógios atómicos altamente estáveis presentes nos satélites e permitem determinar a localização nos três eixos, ou seja, latitude, longitude e altitude com elevada precisão, na ordem de poucos metros e alguns deles até centímetros (Wells *et al.*, 1986).

A cobertura global é garantida por uma constelação de 20 a 30 satélites em MEO (*Medium Earth Orbit*), distribuídos em diversos planos orbitais, designada por segmento espacial (European Space Agency, 2013c). Esta constelação deve assegurar que existem, pelo menos, quatro satélites simultaneamente visíveis em qualquer ponto da superfície terrestre, a qualquer instante (Wells *et al.*, 1986). Os atuais sistemas têm as suas constelações colocadas nos vários planos orbitais com inclinações maiores que 50°, com períodos orbitais de aproximadamente 12 horas, a uma altitude de cerca de 22000 km (European Space Agency, 2013c).

Todavia, os satélites utilizados pelos estados detentores dos sistemas de navegação, divergem nas características entre si, mesmo dentro do próprio sistema, sendo implementadas e desenvolvidas tecnologias, de forma a melhorar o seu desempenho, o tempo de vida útil, rendimento, entre outros, originando as diferentes gerações de satélites (Hegarty & Chatre, 2008).

2.4. Segmento de Controlo

O segmento de controlo, tal como é designado, constitui a infraestrutura necessária ao suporte para a operação dos satélites. As principais tarefas do segmento de controlo são as seguintes (United Nations, 2010) (Wells *et al.*, 1986):

- Acompanhar e controlar os parâmetros orbitais dos satélites;
- Monitorizar o estado dos subsistemas dos satélites, incluindo a monitorização dos painéis solares, energia da bateria e nível do propulsor, utilizado para as manobras do satélite;
- Ativar os satélites de reserva existentes, em caso de necessidade;
- Determinar e atualizar os parâmetros das mensagens de navegação, e os parâmetros de correção dos relógios de cada satélite;
- Efetuar o rastreio passivo dos satélites a partir de estações de monitorização e resolver anomalias destes;

Para conseguir desempenhar todas estas tarefas e funções, o sistema de controlo necessita de vários centros de comando e controlo em que cada um assume um papel exclusivo e contribuem para que o segmento espacial se mantenha no seu devido estado operacional e ainda coopere com as outras estruturas com o objetivo destas conseguirem desempenhar a sua função (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013). Nas estações/centros de controlo são processadas as medições recebidas pelas estações de monitorização/controlo para estimar as órbitas dos satélites e os erros de relógio, para além de outros parâmetros, para gerar a mensagem de navegação (Seeber, 2003). Essas correções e mensagens de navegação são então enviadas para os satélites pelas antenas terrestres, que normalmente estão co-localizadas nas estações de monitorização ou através de estações de envio.

2.5. Segmento de Utilizador

A solução de navegação fornecida por um recetor GNSS assenta no cálculo da distância a um conjunto de satélites, através da extração do tempo de propagação dos *Signal-In-Space* (SIS) transmitidos pelos satélites, que viajam no espaço à velocidade da luz, sendo a interface do utilizador para obtenção da solução de navegação de qualquer um dos sistemas (Seeber, 2003).

Embora a arquitetura do recetor seja adaptada para os diferentes sistemas existentes, variando consoante o tipo de bandas de frequências, para os quais os recetores foram concebidos para operar e para as diferentes aplicações alvo, a constituição básica de um recetor genérico é a seguinte (Parkinson & Spilker, 1996):

- **Antena:** Opera na banda L e tem por função captar os sinais GNSS, o mais possível livres de ruído e de interferências;
- **Conversor A/D:** Tem por função filtrar, amplificar e digitalizar os sinais de entrada;
- **Processador de sinal:** Responsável pela aquisição e acompanhamento do sinal, através de várias rotinas de processamento de sinais;
- **Processamento:** Dependendo da aplicação, o recetor executa diferentes tarefas com as informações GNSS e fornece resultados ao utilizador, normalmente a solução de posicionamento e tempo.

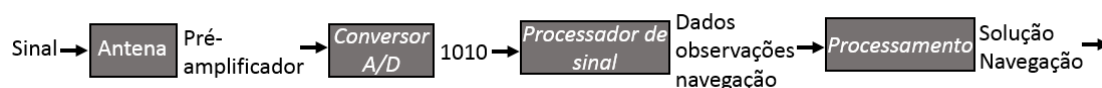


Figura 2.1 – Processo de obtenção de posição num recetor genérico GNSS.¹

Após a receção dos sinais nas antenas, estes são transmitidos, por um pré-amplificador de baixo ruído, que converte o sinal recebido para uma frequência intermédia, permitindo que a conversão analógico-digital e o controlo automático de ganho sejam efetuados (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

¹ Adaptado de (Pereira, 2011).

Os sinais digitais convertidos são então processados por cada um dos canais do recetor digital, contendo cada um deles dois blocos de sincronização. O primeiro, com os dados da mensagem de navegação e o segundo, que efetua a medição da pseudo-distância, para além de permitir que a mensagem de navegação possa ser recuperada pelo utilizador (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013). Estes dados são então processados com mais ou menos rigor, consoante o tipo de recetor que estejamos a utilizar, de forma a obter a solução de navegação, ou seja, o PVT (United Nations, 2004).

Como consequência do surgimento e modernização dos GNSS, nomeadamente a nível da interoperabilidade entre os vários sistemas existentes, os fabricantes de recetores tentam desenvolver produtos capazes de integrar facilmente os novos sistemas, daí a existência de diversos tipos de recetores, os quais se dividem da seguinte forma (Petovello *et al.*, 2008):

- **Recetor multi-constelação:** Para utilização de mais de um dos sistemas GNSS;
- **Recetor multi-frequência:** Para receção de mais que uma frequência GNSS;
- **Recetor de aumento:** Para receção dos sinais dos SBAS;
- **Recetor diferencial:** Para receção de sinais fornecidos por estações que efetuam correções diferenciais, como é o caso dos *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS);
- **Recetor de assistência:** Para permitir melhorar a velocidade de aquisição e processar os dados e soluções calculadas pelos segmentos de controlo dos GNSS.

2.6. Sinais transmitidos

Os sinais de posicionamento transmitidos continuamente pelos satélites de navegação, numa ou mais frequências da banda L, contêm o código da pseudo-distância e os dados de navegação (Wells *et al.*, 1986). Estes permitem aos utilizadores calcular o tempo percorrido desde a transmissão do sinal do satélite até este ser captado pela antena do recetor e, calcular as coordenadas desse mesmo satélite no momento da transmissão do sinal. Os códigos da pseudo-distância são modulados com a mensagem de navegação, de forma a serem combinados posteriormente na frequência da portadora. Uma mesma frequência que contenha informação modulada de diferentes formas, para os diferentes códigos, militar e civil por exemplo, é então misturada, para que possa ser transmitida em

conjunto (Wells *et al.*, 1986). Em suma, os componentes principais do sinal GNSS têm as seguintes particularidades:

- **Portadora:** Frequência que transporta um sinal rádio, que será modulado para representar a informação transmitida nessa frequência;
- **Pseudo-distância:** Sequência de bits, que permite determinar o tempo percorrido pelo sinal rádio, desde que foi transmitido pelo satélite até ser captado pelo recetor, designado por sequências ou códigos *Pseudo-Random Noise* (PRN);
- **Mensagem de navegação:** Uma mensagem de código binário, que fornece informação das efemérides do satélite, parâmetros de correção dos erros do relógio do satélite, parâmetros para correção ionosférica e outros de utilidade para cálculo da solução de navegação, do estado de vida útil deste e outras informações complementares pertinentes.

A informação transmitida no sinal GNSS é modulada. Existem diferentes tipos de modulação para os sinais transmitidos por cada um dos sistemas GNSS, e dentro de cada uma das bandas transmitidas (Ávila Rodríguez, 2008):

- **Phase-Shift Keying (PSK):** Técnica de modulação digital, para combinar, alterando a fase de um sinal de referência. Este pode ser *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) ou *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK). O BPSK consiste em alterar a fase da portadora em 180° cada vez que ocorre uma alteração de bit. O QPSK consiste em alterar a fase da portadora em 90° cada vez que ocorre uma alteração de bit. O QPSK transmite duas vezes mais rápido os dados numa determinada largura de banda (2 bits/s), em comparação com o BPSK (1 bit/s);
- **Binary Offset Carrier (BOC):** Desenvolvido para permitir a interoperabilidade dos sistemas. É uma modulação da sub-portadora, que leva à sua multiplicação, dividindo o espectro em duas partes. Existem variantes desta técnica de modulação pelos GNSS, sendo de destacar a *Multiplexed BOC* (MBOC), *BOC with cosin phasing* (BOCcos), *BOC with sin phasing* (BOCsin), *Alternative BOC* (AltBOC) e *Composite BOC* (CBOC).

As técnicas para transmissão dos sinais, podem ser divididas em duas: a *Code Division Multiple Access* (CDMA) e a *Frequency Division Multiple Access* (FDMA). A CDMA,

utilizada pelo GPS, Galileo e BeiDou, ao contrário da FDMA, utilizada inicialmente pelo GLONASS, tornou-se vantajosa. O CDMA atribui um código de sinal diferente a cada satélite, enquanto a FDMA atribui uma frequência diferente a cada satélite. Deste modo, é possível distinguir a proveniência dos sinais recebidos (Ávila Rodríguez, 2008).

Embora o FDMA, tenha trazido benefícios, face à proteção contra *jamming*, em que apenas os satélites que operassem numa determinada frequência eram afetados, ao contrário dos que utilizavam a técnica CDMA que eram todos eles afetados, uma vez que utilizam a mesma portadora, com as capacidades existentes para desativação das proteções *anti-jamming*, acaba por se tornar dispensável. Em oposição, o FDMA necessita de diferentes portadoras, logo recetores e antenas com capacidade para captar todas as frequências, tornando-se menos competitivo e afluente no mercado em massa GNSS (Ávila Rodríguez, 2008).

Com os vários sistemas a operar na mesma banda de frequências, surge o problema da sua atribuição a cada um dos operadores. Assim sendo, o facto de vários serviços poderem coexistir na mesma banda de frequências, implica estes serem facultados consoante os diferentes propósitos com a atribuição e distribuição coerente das bandas de frequências em que os sistemas podem operar (United Nations, 2012). A *International Telecommunications Union* (ITU) coordena o uso global partilhado do espectro rádio e tem vindo a trabalhar na atribuição das bandas de frequência dos GNSS (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

2.7. Cálculo para posição do recetor

O cálculo da posição do utilizador de um sistema GNSS pode ser feito de duas formas: recorrendo à pseudo-distância ou com a utilização adicional da fase da portadora. Neste caso, o método abordado será o da pseudo-distância, uma medida relacionada com a distância entre o satélite e a antena do recetor, com base na medição do intervalo de tempo de propagação do sinal (Leick, Rapoport, & Tatarnikov, 2015).

A abordagem inicial começa pela distância geométrica, ρ_r^s , entre um recetor r e o satélite s equivalente ao intervalo de tempo de propagação de um sinal, τ , percorrido desde o satélite até ao recetor, multiplicado pela velocidade de propagação, c :

$$\rho_r^s = c \cdot \tau = c \cdot (tt_r - tt^s) \quad (2.1)$$

onde tt_r é o tempo real de receção do sinal, e tt^s é o tempo real de transmissão do sinal, ou seja, o período de tempo medido por um relógio uniforme e perfeitamente sincronizado no satélite e no recetor.

Por outro lado, a distância geométrica também ela depende quer da posição do recetor, $\vec{X}_r(x_r, y_r, z_r)$, em função do tempo real de receção, tt_r , quer da posição do satélite, $\vec{X}^s(x^s, y^s, z^s)$, em função do tempo real de transmissão, tt^s :

$$\begin{aligned} \rho_r^s(tt_r - tt^s) &= |\vec{X}_r(tt_r) - \vec{X}^s(tt^s)| = \\ &= \sqrt{(x_r(tt_r) - x^s(tt^s))^2 + (y_r(tt_r) - y^s(tt^s))^2 + (z_r(tt_r) - z^s(tt^s))^2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Convém realçar que, o tempo do recetor, mantido por um relógio construído no recetor e o tempo do satélite, mantido por um relógio construído no satélite, não estão sincronizados e apresentam ambos erros quando comparados com um tempo de referência uniforme, o qual é mantido continuamente pelo sistema de controlo GNSS, podendo ser tanto *GPS Time* (GPST), *GLONASS Time* (GLONASST), *Galileo System Time* (GST), *BeiDou Time* (BDT) ou qualquer outro sistema de tempo existente, desde que utilizado como referência de tempo real GNSS (Leick *et al.*, 2015).

Assim, as relações de tempo existentes, entre o tempo real e o tempo observado no relógio do satélite, t^s , e o tempo observado no relógio do recetor, t_r , são as seguintes:

$$\begin{aligned} tt_r &= t_r - \delta t_r \\ tt^s &= t^s - \delta t^s \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde δt_r é o erro do relógio do receptor e δt^s do relógio do satélite, ambos em segundos.

A mensagem de navegação recebida pelo recetor permite ao utilizador calcular, a posição do satélite no sistema de coordenadas *Earth Centered Earth Fixed* (ECEF), $\vec{X}^s(x^s, y^s, z^s)$, e o erro do relógio do satélite, δt^s , tendo deste modo como incógnitas as coordenadas do recetor, $\vec{X}_r(x_r, y_r, z_r)$, e o erro do relógio do recetor, δt_r .

Analisando as últimas equações dos erros do relógio, surge uma nova distância, designada de pseudo-distância, P , que expressa a distância geométrica mais um conjunto de erros com diferentes significados físicos, contabilizando-se apenas neste caso, os erros dos relógios (do satélite e recetor), resultando na seguinte equação:

$$\begin{aligned}
P_r^s(t_r) &= c \cdot (t_r - t^s) = c \cdot (tt_r + \delta t_r) - c \cdot (tt^s + \delta t^s) \\
&= c \cdot (tt_r - tt^s) + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s) \\
&= \rho_r^s(tt_r) + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

A pseudo-distância é medida no tempo de propagação do sinal observado no relógio do recetor, t_r , e não em tempo real, tt_r , o que significa que a distância referente ao tempo real na equação anterior, pode ser do tempo do recetor, o que requer uma correção adicional. Para isso, a distância geométrica do tempo real, pode ser linearizada no tempo nominal do recetor:

$$\rho_r^s(tt_r) = \rho_r^s(t_r) + \frac{d\rho(t_r)}{dt}(tt_r - t_r) = \rho_r^s(t_r) - \frac{d\rho(t_r)}{dt}\delta t_r \tag{2.5}$$

A parcela $\frac{d\rho(t_r)}{dt}\delta t_r$ representa a distância geométrica devido ao erro do relógio do recetor, δt_r . A velocidade radial do satélite é nula se o satélite estiver no ponto mais perto da aproximação e pode atingir valores acima de 800 m/s para ângulos de elevação iguais a 10°, o que significa que o erro na distância induzida pela parcela será menor que 1 mm, caso o erro do relógio do recetor seja estimado com uma precisão de 1 μ s. Devido a esta pequena contribuição, o termo $\frac{d\rho(t_r)}{dt}\delta t_r$ é muitas vezes negligenciado e não está listado em todas as equações (Leick *et al.*, 2015).

Tendo em conta que a posição do satélite deve ser calculada no tempo real de transmissão e que, após o período de transmissão o satélite altera a sua posição, face às características do seu raio orbital e velocidade, ocorrerá um erro significativo. O tempo de propagação do sinal é estimado pelo recetor, como o tempo necessário para alinhar e correlacionar uma réplica do código PRN gerado pelo recetor, com uma outra gerada e enviada pelo satélite (Leick *et al.*, 2015). O tempo de transmissão de um sinal pode ser estimado pela subtração do intervalo de propagação medido pelo recetor, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
tt^s &= tt_r - (tt_r - tt^s) \Leftrightarrow t^s - \delta t^s = t_r - \delta t_r - (tt_r - tt^s) \\
\Leftrightarrow t^s &= t_r - \delta t_r + \delta t^s - (tt_r - tt^s) = t_r - \frac{P(t_r)}{c}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Tomando as correções anteriores em consideração na equação para a pseudo-distância, representando apenas os erros do relógio do recetor e satélite, é representada desta forma:

$$\begin{aligned}
P_r^s(t_r) &= \rho_r^s(t_r) + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s) = \\
&= \sqrt{(x_r(t_r) - x^s(t^s))^2 + (y_r(t_r) - y^s(t^s))^2 + (z_r(t_r) - z^s(t^s))^2} + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s)
\end{aligned} \quad (2.7)$$

O modelo de pseudo-distância representado é utilizado no posicionamento absoluto básico do GNSS com observações da pseudo-distância em frequência única, tal como o *Standard Positioning Service* do GPS ou o *Standard Precision* do GLONASS.

2.8. Fontes de erro relevantes

Existem diversas fontes de erro que contribuem para a degradação do sinal transmitido a partir do satélite e outras que influenciam o rigor no cálculo da pseudo-distância (United Nations, 2012). No âmbito deste trabalho destacam-se apenas as fontes de erro mais relevantes para a observação e cálculo da posição por pseudo-distância. Assim para além dos erros do relógio referidos, que dependem diretamente do satélite e do recetor, os erros dos efeitos da propagação do sinal, devido às camadas da ionosfera e troposfera e o fenómeno de multi-trajecto são os que mais se acentuam, com discrepâncias na ordem dos metros (Kaplan & Hegarthy, 2006).

Assim, teremos uma pseudo-distância com erros ionosférico, $\delta_{ion}(e)$, troposférico, $\delta_{trop}(e)$, multi-trajecto, δ_{mult} , e residuais, εP , associados, como é possível verificar na seguinte equação (Seeber, 2003):

$$P_r^s(t_r) = \rho(t_r) + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s) + \delta_{ion}(e) + \delta_{trop}(e) + \delta_{mult} + \varepsilon P \quad (2.8)$$

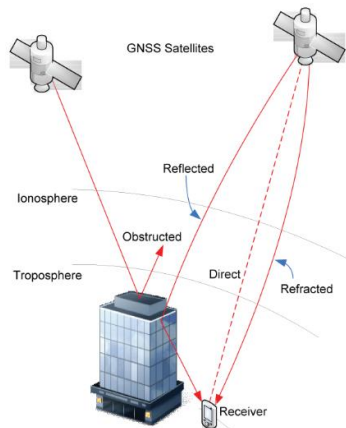


Figura 2.2 – Erros relevantes, associados à propagação do sinal GNSS.²

² Adaptado de (NovAtel, s.d.)

2.8.1. Erro ionosférico

A camada da ionosfera, composta por gases ionizados e localizada entre os 50 km e 1000 km de altitude, é um dos fatores que influencia a velocidade de propagação de um sinal eletromagnético (rádio), levando ao chamado atraso ionosférico (Klobuchar, 1996). Primeiro devido à quantidade de elétrons livres que atravessa ao longo do seu caminho, $n_e(l)$, quantificada como *Total Electron Content* (TEC) na equação abaixo (Xu, 2007) ,

$$TEC = \int_S^R n_e(l) dl \quad (2.9)$$

segundo, pelo facto da ionosfera ser um meio dispersivo de ondas rádio, gerando um índice de refatividade que varia com a frequência dos sinais, f e a velocidade de fase ser diferente da velocidade de grupo (Davies, 1989). O atraso ionosférico no sinal GNSS, $\delta_{ion}(f)$, causado pela propagação na ionosfera em função da frequência, é representado pela seguinte equação:

$$\delta_{ion}(f) = \frac{40,3 \cdot TEC}{f^2} \quad (2.10)$$

A modelação do atraso ionosférico pode no entanto ser simplificada, considerando que a quantidade de elétrons livres na diagonal é proporcional à quantidade de elétrons livres medidos verticalmente *Vertical Total Electron Content* (VTEC), sendo essa proporção mais conhecida por fator de obliquidade, OF (*Obliquity Factor*), e a mais utilizada, calculada da seguinte forma (Klobuchar, 1996):

$$TEC(e) = OF_I(e) \cdot VTECV \quad (2.11)$$

$$OF_I(e) = \left[1 - \left(\frac{R_{\oplus} \sin(90 - e)}{R_{\oplus} + h_I} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.12)$$

onde e é o ângulo de elevação do satélite relativamente ao utilizador, R_{\oplus} o raio médio da Terra e h_I a altitude média da ionosfera, 350 km (Gonçalves, 2011). A aplicação desta fórmula, permite que o atraso ionosférico, $\delta_{ion}(e)$, esteja dependente do ângulo de elevação, e de um atraso ionosférico vertical, $\delta_{ion}(z)$, comum a todos os satélites:

$$\delta_{ion}(e) = \delta_{ion}(z) \cdot OF_I(e) \quad (2.13)$$

2.8.2. Erro troposférico

A camada da troposfera, composta por gases secos e vapor de água, que se estende desde a superfície do mar até cerca dos 16 km de altitude, é outros dos fatores que influencia a velocidade de propagação de um sinal eletromagnético, resultando no atraso troposférico (Sprinkler, 1996).

Ao contrário da ionosfera, esta não é dispersiva para as frequências rádio e, o seu índice de refratividade não depende da frequência dos sinais (Sprinkler, 1996). O atraso vertical na troposfera, deve-se a dois fatores (Sprinkler, 1996). Por um lado, o efeito hidrostático devido aos gases secos, $\delta_{hyd,z}$, responsável por 90%, e por outro, o vapor de água da atmosfera, $\delta_{wet,z}$, responsável pelos restantes 10%, representados pelas equações,

$$\delta_{hyd,z} = 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{P_0 h_d}{T_0 5} \quad (2.14)$$

$$\delta_{wet,z} = 0,373 \cdot \frac{e_0 h_w}{T_0^2 5} \quad (2.15)$$

em que P_0 é a pressão total (mbar), T_0 a temperatura absoluta, e_0 a pressão parcial de vapor de água (mbar), h_d a altitude padrão a que a refratividade devido aos gases secos é nula (43 km) e h_w a altitude análoga à anterior mas para o vapor de água (12 km) (Gonçalves, 2011). Assim, o atraso troposférico, $\delta_{trop}(e)$, tendo em conta estes atrasos anteriores e um fator multiplicativo, em função da elevação, e , no mapeamento $m(e)$ de atraso de ambos os gases, resulta na equação final seguinte (Marreiros, 2012):

$$\delta_{trop}(e) = m_{hyd}(e) \cdot \delta_{hyd,z} + m_{wet}(e) \cdot \delta_{wet,z} \quad (2.16)$$

2.8.3. Erro multi-trajeto

O fenómeno de multi-trajeto, resultante das várias reflexões dos sinais emitidos pelos GNSS nas estruturas na vizinhança do recetor e no solo, levam a que cheguem sinais secundários às antenas dos recetores, para além do sinal direto, reduzindo a razão sinal-ruído e gerando um erro, face à incapacidade de um recetor distinguir o sinal direto dos refletidos, δ_{mult} (Marreiros, 2012).

De modo a evitar este erro, existem métodos físicos, como a colocação das antenas longe de superfícies refletoras ou utilização de antenas direcionais, assim como métodos

de processamento do sinal, com os códigos dos sistemas GNSS propositadamente concebidos para terem uma função de autocorrelação praticamente nula, para atrasos de código maiores que 450 m (Misra & Enge, 2011) (Gonçalves, 2011).

2.8.4. Erro de ruído e outros efeitos não-modulados

Para além das fontes de erro já referidas, existem ainda erros residuais, com uma ordem de grandeza na ordem dos centímetros, que dizem respeito à medição do ruído térmico do recetor, que ocupa uma faixa espectral contínua que vai desde 0 Hz até centenas de GHz (Marreiros, 2012). Juntamente com este, os erros de seguimento do código e ainda erros de posição do satélite, ou seja, erros de efeméride da órbita, designadamente imprecisões na localização difundida pelo satélite, são agregados resultando numa constante, designada, ε_P (Misra & Enge, 2011).

2.9. Sistemas de referência geodésica

Um sistema de referência geodésico, permite localizar espacialmente qualquer objeto relativamente a uma superfície geométrica que se defina para a Terra, a partir da adoção de um elipsóide de referência, posicionado e orientado em relação a esta (Leick *et al.*, 2015).

Face à evolução tecnológica, obtiveram-se ganhos de exatidão na definição dos sistemas de referência geodésicos, e sob este ponto de vista, tanto os organismos e empresas voltadas para a produção cartográfica, como os utilizadores de dados georreferenciados, utilizam informações baseadas em diferentes sistemas, daí a extrema importância em se conhecer as características de cada um deles, e que as coordenadas geodésicas de um mesmo ponto variam consoante o sistema de referência utilizado (Bahrami & Ziebart, 2012) (Hegarty & Chatre, 2008).

Todos os sistemas de referência, em GNSS, são do tipo ECEF (*Earth Centered Earth Fixed*), um sistema de referência rotativo, que envolve um modelo matemático da terra, em que as posições dos pontos são expressas em metros e têm pequenas variações temporais devido aos efeitos geofísicos (Seeber, 2003). Os eixos deste sistema têm origem no centro da Terra e são definidos do seguinte modo:

- **Eixo-X:** Contém o ponto de intersecção do plano equatorial com o meridiano de Greenwich;

- **Eixo-Y:** Obtido de modo a satisfazer a regra da mão-direita de um sistema tri-ortogonal;
- **Eixo-Z:** Colinear com o eixo de rotação médio da Terra medido entre 1900 e 1905, positivo no sentido Norte.

2.9.1. Sistema de Referência WGS-84

O *World Geodetic System* 1984 (WGS-84), é um sistema de referência terrestre, desenvolvido pelo DoD dos EUA e utilizado desde 1987 para o sistema de navegação americano GPS (Seeber, 2003).

O facto das efemérides GPS transmitidas estarem ligadas à posição do centro de fase da antena de satélite neste sistema de referência, permite que as coordenadas dos recetores sejam expressas na estrutura ECEF (National Geospatial-Intelligence Agency, 2014).

A implementação do WGS-84 foi realizada a partir de um conjunto de mais de mil locais terrestres, com coordenadas obtidas de observações do sistema *Transit*, posteriormente com refinações sucessivas, utilizando coordenadas mais rigorosas de estações de monitorização, levando a um atual nível de precisão na ordem do centímetro (National Geospatial-Intelligence Agency, 2014).

Organização Responsável	National Geospatial-Intelligence Agency	
Nome da modelação	WGS-84	
TRS Associado	WGS-84	
Cobertura	Global	
Tipo de modelação	3-Dimensional Ortogonal	
Versão em uso (ano)	WGS-84 G1762 (2013)	
Parâmetros do elipsóide		
Semieixo maior do elipsóide	α	6 378 137,0 m
Fator de achatamento	f	1 / 298,257223563
Velocidade angular da Terra	ω	7, 292 115 x 10 ⁻⁵ rad/s
Constante gravitacional	GM	3 986 004 418 x 10 ⁻⁵ m ³ /s ²
Velocidade da luz no vácuo	c	2,99792458 x 10 ⁸ m/s

Tabela 2.1 – Descrição do sistema de referência geodésico americano utilizado pelo GPS.³

³ Adaptado de (National Geospatial-Intelligence Agency, 2014).

2.9.2. Sistema de Referência PZ-90

O *Parametry Zemli 1990* (PZ-90), é um sistema de referência terrestre utilizado para o sistema de navegação russo GLONASS (Military Topographic Department of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation, 2014).

O facto das efemérides GLONASS transmitidas estarem ligadas à posição do centro de fase da antena de satélite no sistema de referência PZ-90, permite que as coordenadas dos recetores sejam expressas na mesma estrutura ECEF (Russian Institute of Space Device Engineering, 2008).

Em 2001, após uma revisão a este sistema, através de uma versão atualizada, PZ-90.11, passou a ter-se um nível de rigor na ordem do metro, aquando da sua transformação para o WGS-84 (Federal Space Agency, 2014). Assim, desde o final de 2013, com o plano de modernização GLONASS, a implementação deste sistema de referência na informação das efemérides, foi modernizado em todos os satélites operacionais GLONASS, transmitindo estes em PZ-90.11 (Russian Institute of Space Device Engineering, 2008).

Organização Responsável	Ministry of Defense of the Russian Federation	
Nome da modelação	PZ-90	
TRS Associado	PZ-90	
Cobertura	Global	
Tipo de modelação	3-Dimensional	
Versão em uso (ano)	PZ-90.11 (2010)	
Parâmetros do elipsóide		
Semieixo maior do elipsóide	α	6 378 136,0 m
Fator de achatamento	f	1 / 298,257839303
Velocidade angular da Terra	ω	7, 292 115 x 10 ⁻⁵ rad/s
Constante gravitacional	GM	3 986 004 418 x 10 ⁻⁵ m ³ /s ²
Velocidade da luz no vácuo	c	2,99792458 x 10 ⁸ m/s

Tabela 2.2 – Descrição do sistema de referência geodésico russo utilizado pelo GLONASS.⁴

2.9.3. Sistema de Referência GTRF

O *Galileo Terrestrial Reference Frame* (GTRF) é um sistema de referência terrestre desenvolvido pelo *Galileo Geodetic Reference Service Provider* (GRSP), para o sistema de navegação por satélite Galileo e, será uma concretização independente do

⁴ Adaptado de (Russian Institute of Space Device Engineering, 2008).

International Terrestrial Reference System (ITRS), ao contrário dos sistemas russo e americano (Galileo Geodetic Service Provider, *s.d.*).

O GTRF operacional deverá incluir todas as estações de sensores Galileo e estações do *International GNSS Service* (IGS) selecionadas, para o alinhamento do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) e para a densificação da rede, visando melhorar a o rigor na definição do GTRF (European Union, 2014).

De acordo com as exigências do Galileo, as diferenças tridimensionais da posição em relação ao ITRF não deverão exceder os 3 cm (Galileo Geodetic Service Provider, *s.d.*).

Organização Responsável	European Space Agency	
Nome da modelação	GTRF	
TRS Associado	ITRS	
Cobertura	Global	
Tipo de modelação	3-Dimensional Ortogonal	
Versão em uso (ano)	GTRF14v01 (2014)	
Parâmetros do elipsóide		
Semieixo maior do elipsóide	α	N.A.
Fator de achatamento	f	N.A.
Velocidade angular da Terra	ω	7, 292 115 x 10 ⁻⁵ rad/s
Constante gravitacional	GM	3 986 004 418 x 10 ⁻⁵ m ³ /s ²
Velocidade da luz no vácuo	c	2,99792458 x 10 ⁸ m/s

Tabela 2.3 – Descrição do sistema de referência geodésico europeu utilizado pelo Galileo.⁵

2.9.4. Sistema de Referência CTRF2000

O *China Geodetic Coordinate System 2000* (CGCS2000) é um sistema de referência terrestre para posicionamento e vetores de referência e está a ser preparado pelo Governo Chinês, para o sistema de navegação chinês BeiDou (National Academy of Engineering, 2012).

O CGCS 2000 baseia-se num conjunto consistente de constantes e parâmetros de modulação que descrevem o tamanho da Terra, compatível com o ITRS (National Bureau of Surveying and Geo-information, 2012).

O sistema de referência do CGCS 2000 é o *China Terrestrial Reference Frame 2000* (CTRF 2000), mantido por 28 *Continuously Operating Reference Station* (CORS) e mais

⁵ Adaptado de (Galileo Geodetic Service Provider, *s.d.*).

de 2500 estações de GPS, sendo o sistema geodésico chinês padrão de referência para informações geoespaciais (National Bureau of Surveying and Geo-information, 2012).

Organização Responsável	National Bureau of Surveying and Geo-information	
Nome da modelação	CTRF 2000	
TRS Associado	ITRS	
Cobertura	Global	
Tipo de modelação	3-Dimensional	
Versão em uso (ano)	CTRF 2000 (2000)	
Parâmetros do elipsóide		
Semieixo maior do elipsóide	a	6 378 137,0 m
Fator de achatamento	f	1 / 298,257222101
Velocidade angular da Terra	ω	7, 292 115 x 10 ⁻⁵ rad/s
Constante gravitacional	GM	3 986 004 418 x 10 ⁻⁵ m ³ /s ²
Velocidade da luz no vácuo	c	2,99792458 x 10 ⁸ m/s

Tabela 2.4 – Descrição do sistema de referência geodésico chinês utilizado pelo BeiDou.⁶

2.10. Interoperabilidade

A interoperabilidade é definida pelo *International Committee on GNSS* (ICG) como “a capacidade dos sistemas de navegação por satélite globais e regionais aumentarem e providenciarem os seus serviços, para que possam ser utilizados em conjunto, fornecendo melhores capacidades ao nível de utilizador, do que seria possível dependendo exclusivamente de sinais livres de um só dos sistemas.” (United Nations, 2010).

Aliado a este facto, novos e modernos sistemas de navegação têm sido anunciados na última década, com o objetivo de colmatar a carência de desempenhos no recetor alvo de um único sistema, especialmente em condições desafiadoras, como é o caso dos ambientes urbanos (Hein, 2006). O surgimento e modernização do GNSS implicam discussões, no que diz respeito à compatibilidade/interoperabilidade dos diferentes serviços prestados pelos sistemas (Gianni, Fuchs, Simone, & Lisi, 2012). Assim, encontramos-nos perante dois níveis de avaliação diferentes de interoperabilidade, a nível do sistema e a nível do sinal.

Ao nível do sistema, a interoperabilidade é vista como a capacidade dos sistemas fornecerem a mesma solução autónoma, considerando já as respetivas restrições de desempenho (United Nations, 2012). Os recetores GNSS devem ser redundantes e

⁶ Adaptado de (National Bureau of Surveying and Geo-information, 2012).

concebidos para serem interoperáveis ao nível do sistema e serem capazes de fornecer a mesma solução de navegação utilizados isoladamente (Hein, 2006).

No que se refere à interoperabilidade ao nível do sinal, esta é conseguida quando os sinais fornecidos pelos diferentes sistemas são semelhantes o suficiente, de modo a permitir serem captados pelos recetores e utilizados para o cálculo da solução.

Portanto, para que exista interoperabilidade, é necessário considerar os seguintes fatores (Hein, 2006):

- **Sistemas de referência geodésica:** Depende do sistema de coordenadas usado para posicionamento dos satélites, sendo necessário garantir a conversão com o rigor suficiente entre sistemas de referência de coordenadas diferentes;
- **Tempo de referência:** Apesar do sistema de referência do tempo padrão internacional ser o *Universal Time Coordinated/Temps Atomic International* (UTC/TAI), cada um dos sistemas possui o seu tempo, daí os fornecedores dos serviços acordarem em transmitir a diferença de tempo existente;
- **Utilização da mesma frequência:** A utilização da mesma banda de frequências por diferentes sistemas tem um grande impacto positivo na redução da complexidade e no custo do recetor. Assim, os sistemas são considerados interoperáveis a este nível, aquando do emprego da mesma banda de frequências;
- **Signal-in-Space (SIS):** Os aspetos da conceção do sinal GNSS, como a modulação, estrutura ou tipo de códigos, não afetam a interoperabilidade.

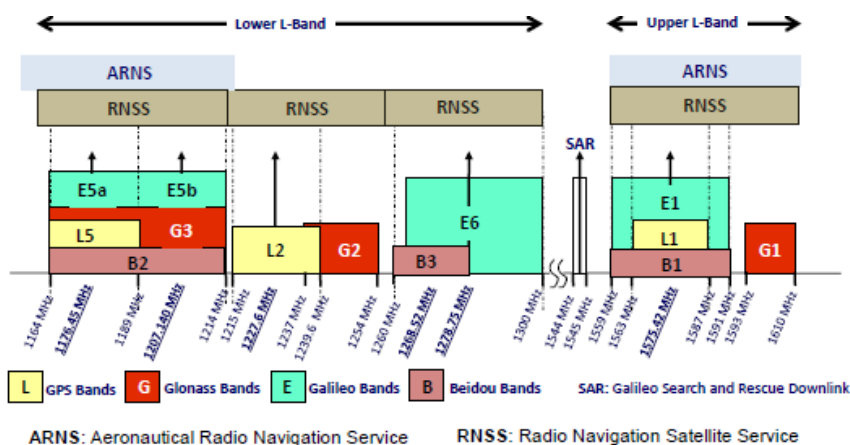


Figura 2.3 – Interoperabilidade a nível de utilização da banda de radiofrequências.⁷

⁷ Adaptado de (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

Capítulo 3. *Global Positioning System*

O *Global Positioning System* (GPS) é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pelo DoD dos EUA, que utiliza uma constelação de satélites posicionada em órbitas do tipo MEO, projetado com o objetivo de fornecer serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo para utilizadores militares e civis numa base contínua global, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (Federal Aviation Administration, 2015b).

O conceito GPS apareceu em 1973, quando o DoD decidiu desenvolver um sistema de navegação por satélite, baseado no seu sistema anterior, o *Transit*, para utilização militar (Federal Aviation Administration, 2014b). Em 1977, foram realizados os primeiros testes com um recetor utilizando pseudo-satélites e, o primeiro satélite operacional GPS foi lançado em 1978. Em 1993, o sistema atingiu a constelação nominal de 24 satélites, no mesmo ano em que foi decidido disponibilizar o sinal para utilização civil (Aeronautics and Space Engineering Board National Research Council, 1995) (Thuy, 2015). Em 1995, foi atingida a *Full Operational Capability* (FOC) do sistema, com os satélites da primeira geração (U.S. Coast Guard Navigation Center, 1995).

Cinco anos mais tarde, e já com a segunda geração a ser lançada para a órbita com a nova capacidade de degradação intencional e seletiva do sinal, *Selective Availability* (S/A), que distinguia o posicionamento militar/autorizado do civil. Em Maio de 2000 foi declarada a desativação da S/A, por parte do presidente americano da altura, Bill Clinton e que viria a permitir no futuro melhorar a precisão e rigor dos utilizadores civis (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2013a). Em 2007, foi anunciada a decisão que a próxima geração de satélites GPS, não possuiria o S/A e deste modo eliminaria a incerteza existente quanto a este assunto, por parte da comunidade de utilizadores internacional (Office of the Press Secretary, 2007).

3.1. Segmento Espacial

A constelação nominal base GPS é constituída no mínimo por 21+3 satélites operacionais (21 satélites ativos e 3 de reserva), distribuídos em 6 planos orbitais, perfazendo um total de 4 por cada um deles, com uma inclinação de 55° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 60° de plano para plano. Existe uma reposição da posição do satélite em cada plano orbital, sendo o sistema capaz de

suportar uma constelação de até 30 satélites em órbita (Federal Aviation Administration, 2014f).

Os satélites GPS operam em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade inferior a 0.01° e um semieixo maior de 26560 km, correspondente a uma altitude de 20180 km, referente a uma MEO (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015d). Os satélites possuem um período orbital de 11 h 58 m (12 h siderais), o que significa que para um observador estacionário, o mesmo satélite é visível no mesmo ponto do céu a cada dia sideral (U.S. Air Force, 2010).

3.1.1. Constelação de Satélites

A construção dos satélites GPS evoluiu com o tempo, apresentando cada geração características similares entre si, designadas por *block*, as seguintes configurações:

- **Block I, Satélites de Desenvolvimento para Navegação:** Foram enviados para a órbita onze destes satélites entre 1978 e 1985, sem a S/A. Tinham a capacidade de fornecer o serviço de posicionamento por 3 ou 4 dias sem qualquer contacto com o segmento de controlo, perante um tempo de vida útil previsto de 4 anos e meio e alguns chegaram aos 10 (United States Naval Observatory, 1996);
- **Block II e IIA, Satélites Operacionais:** Foram enviados para a órbita 28 destes satélites a partir de 1989, estando ainda alguns operacionais. Têm a capacidade de fornecer o serviço de posicionamento por 180 dias sem qualquer contacto com o segmento de controlo, perante um tempo de vida útil previsto de 7 anos e meio. Desde 1990, foi utilizada uma versão melhorada, *Block IIA*, com capacidade de comunicação mútua (United States Naval Observatory, 2015);
- **Block IIR, Satélites Operacionais Substitutos (R, *Replenishment*):** O primeiro destes satélites foi enviado para a órbita em 1997, de modo a perfazer um conjunto de vinte satélites do *Block II*, ao qual se pode adicionar pelo menos mais seis. Têm a capacidade de fornecer o serviço de posicionamento mais de seis meses sem qualquer contacto com o segmento de controlo e sem privar do rigor das efemérides, perante um tempo de vida útil previsto de 10 anos. Estes satélites podem determinar as suas próprias órbitas, calcular a mensagem de navegação e

medir distâncias entre eles, transmitindo dados para outros satélites ou segmento de controlo (United States Naval Observatory, 2015);

- ***Block IIR-M, Satélites Modernizados (M, Modernized)***: Com características semelhantes às do *Block IIR*, o primeiro destes satélites foi enviado para a órbita em 2005 e é composto por um total de oito, acrescentando um novo sinal militar e o mais robusto sinal civil, L2C (United States Naval Observatory, 2015);
- ***Block IIF, Satélites Operacionais de Acompanhamento (F, Follow-on)***: Com características semelhantes às do *Block IIR*, o primeiro destes satélites foi enviado para a órbita em 2010, e inclui o terceiro sinal civil na banda L5, perante um tempo de vida útil previsto de 12 anos, acrescentando sistemas de navegação inercial (United States Naval Observatory, 2015) (Los Angeles Air Force Base, 2014b);

3.1.2. Satélites de Navegação GPS

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação GPS, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

3.2. Segmento de Controlo

O *Operational Control Segment* (OCS) começou a ser operado em 1985, constituído por cinco estações de monitorização, quatro antenas terrestres para *upload* e o *Operational Control Center* (OCC) (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015b). Atualmente, é constituído por quatro grandes subsistemas, o *Master Control Station* (MCS), o *Backup Master Control Station* (BMCS), doze *Ground Antenna* (GA's) e uma rede de dezasseis *Monitor Station* (MS's) globalmente distribuídas, responsável pelo funcionamento apropriado do sistema (Federal Aviation Administration, 2014c).

3.2.1. Master Control Stations

Localizada em Colorado Springs, a MCS é o elemento central do sistema de controlo e monitorização do funcionamento do GPS, que processa as medições recebidas pelas MS e tem responsabilidade por todos os aspetos de comando e controlo da constelação (Misra & Enge, 2011).

3.2.2. Monitor Stations

As MS estão distribuídas de forma uniforme por todo o planeta e equipadas com relógios atômicos padrão e recetores GPS. Estas estações adquirem continuamente dados de todos os satélites visíveis. Os dados obtidos são então enviados para a MCS, onde são processados para estimar as órbitas e os erros de relógio dos satélites, para gerar a mensagem de navegação e outros parâmetros do sistema (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015b).

A fim de melhorar o desempenho e rigor, foram incorporadas novas estações, entre 2001 e 2006, o que permitiu uma melhor cobertura de visibilidade da constelação. Com esta configuração, cada satélite é visto permanentemente a partir de pelo menos 3 estações de monitorização, o que permite melhorar o cálculo das órbitas e os dados de efemérides e por conseguinte melhorar o rigor do sistema.

3.2.3. Ground Antenna

As GA estão co-localizadas em quatro das MS. A comunicação das GA com os satélites efetua-se na banda S, para transmissão e atualização das efemérides e informações de correções de relógio, transmitidas com a mensagem de navegação, bem como informação de telemetria e comando a partir das MCS (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015b). Esta informação pode ser adquirida por cada satélite 3 vezes por dia, ou seja, a cada 8 horas, apesar de geralmente ser feita apenas uma vez (NASA Earth Observatory, *s.d.*).

3.3. Segmento de Utilizador

Uma vez o sinal adquirido e iniciado o seu seguimento pela antena, o recetor descodifica a mensagem de navegação e estima a posição do utilizador (U.S. Coast Guard Navigation Center, 2014).

Além da posição e velocidade, devido a um grande número de atividades económicas, como telemóveis, redes de energia elétrica ou financeiras, que dependem da referência de tempo para a sincronização e eficiência operacional, os recetores GPS permitem determinar o tempo com alta precisão, sem a necessidade de utilizar relógios atômicos dispendiosos (Federal Aviation Administration, 2014g).

3.3.1. Serviços

O GPS fornece dois serviços de posicionamento diferentes: o *Standard Positioning Service* (SPS) e o *Precise Positioning Service* (PPS) num código modulado, utilizando a técnica CDMA.

3.3.1.1. *Standard Positioning Service*

O SPS é um serviço de posicionamento e tempo fornecido, através dos sinais nas frequências GPS L1, L2 e L5, transmitidos por todos os satélites, que contém o código de Coarse/Acquisition (C/A) e o código Civil (C), com uma mensagem de dados de navegação, que está disponível para uso civil, comercial e científico (Grimes, 2008a).

3.3.1.2. *Precise Positioning Service*

O PPS é um serviço de posicionamento e tempo fornecido, através do acesso autorizado aos sinais que são transmitidos nas frequências GPS L1 e L2. A frequência L1, transmitida por todos os satélites, contém o código de *Coarse/Acquisition* (C/A), com uma mensagem de dados de navegação, que está disponível para uso civil, comercial e científico, e o código *Precision* (P), alterado criptograficamente para se tornar no código Y, com uma mensagem de dados de navegação, disponível apenas para utilizadores com chaves criptográficas válidas. Estes satélites transmitem ainda, um segundo código P ou Y (P (Y)), com uma mensagem de dados de navegação na frequência L2, reservado para utilização militar e de utilizadores civis autorizados (Grimes, 2007).

De forma a restringir o acesso de utilizadores civis à precisão do sistema completo, foram assim introduzidas as seguintes proteções:

- ***Selective Availability* (S/A)** (Federal Aviation Administration, 2014e): Resulta numa degradação intencional do relógio do satélite com impacto direto nas pseudo-distâncias calculadas pelos recetores e na manipulação das efemérides, omitindo as informações relacionadas com as órbitas (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2013a). Estes dois efeitos em conjunto levam à degradação do posicionamento horizontal. Conforme referido atrás, a S/A foi desativada em Maio de 2000;
- ***Anti-Spoofing* (A/S)** (NovAtel, 2013): Consiste num código P encriptado, combinado com um código secreto W, dos quais resulta um código Y, modulado

ao longo das duas emissões L1 e L2, permitindo protegê-lo para que possa ser utilizado apenas por receptores autorizados e simultaneamente evitar a possível falsificação do sinal, que poderia confundir os receptores militares. A utilização de A/S não impede os utilizadores de tirar partido do código C/A.

Os utilizadores autorizados que recebem as chaves de encriptação para acesso ao PPS no seu recetor, obtêm o máximo rigor do GPS, enquanto o mesmo recetor que não for incitado com essas chaves válidas, poderá ainda assim, funcionar como um recetor SPS.

3.3.2. Configuração do Sinal

O GPS utiliza a técnica CDMA para enviar os diferentes sinais atuais na mesma frequência e o método de modulação BPSK para as bandas L1 e L2 do código C/A e P (Y) e o método BOC para as bandas L1 e L2 militares/encriptadas do código M (Ávila Rodríguez, 2008).

A banda L1 GPS é a mais importante para fins da navegação, dado que a maioria das aplicações compreende os sinais transmitidos nessa frequência (Ávila Rodríguez, 2008). Existem, atualmente, três sinais transmitidos pelo GPS nesta frequência e um futuro sinal civil, L1C, que será transmitido com modulação MBOC.

Código PRN	C/A	P	M	L1C-I	L1C-Q
Frequência central	1575,42 MHz				
Banda Frequência	L1				
Técnica de acesso	CDMA				
Componente do sinal	Data	Data	N.A.	Data	Piloto
Modulação	BPSK (1)	BPSK (10)	BOC _{sin} (10,5)	MBOC (6,1,1/11)	
Frequência do código	1.023 MHz	10.23 MHz	5.115 MHz	1.023 MHz	
Tipo Serviço	SPS	PPS	PPS	SPS	
Velocidade dos dados	50 bps	50 bps	N/A	50 bps	-

Tabela 3.1 – Características do sinal L1 GPS.⁸

A banda L2 GPS transmitida, possuirá um sinal civil modernizado conhecido como L2C, juntamente com os existentes, que terá um período de transição do código C/A para L2C, no qual poderão ocorrer configurações mistas (Ávila Rodríguez, 2008). Além disso,

⁸ Adaptado de (Misra & Enge, 2011).

os *Blocks IIR-M* e *IIF* serão detentores de um sinal adicional, subdividido no código L2 CM e no código L2 CL, de modo que a velocidade seja duas vezes mais elevada.

Código PRN	P	M	L2 CM	L2 CL
Frequência central	1227,60 MHz			
Banda Frequência	L2			
Técnica de acesso	CDMA			
Componente do sinal	Dados	N.A.	Dados	Piloto
Modulação	BPSK (10)	BOC _{sin} (10,5)	BPSK (1)	
Frequência do código	10.23 MHz	1.023 MHz	1.023 MHz	
Tipo Serviço	PPS	PPS	SPS	SPS
Velocidade dos dados	50 bps	N/A	25 bps	-

Tabela 3.2 – Características do sinal L2 GPS.⁹

A banda GPS L5 será emitida pela primeira vez a bordo dos satélites IIF, com a frequência modulada em quadratura de fase em dois canais, o canal de dados, com o código em base e o canal piloto, com o código em quadratura de fase (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	L5-I	L5-Q
Frequência central	1176,45 MHz	
Banda Frequência	L5	
Técnica de acesso	CDMA	
Componente do sinal	Dados	Piloto
Modulação	BPSK (10)	BPSK (10)
Frequência do código	10.23 MHz	
Tipo Serviço	SPS	
Velocidade dos dados	50 bps	-

Tabela 3.3 – Características do sinal L5 GPS.¹⁰

3.3.3. Performance

Os níveis de desempenho que os utilizadores podem esperar do GPS são especificados no *Standard Positioning Service Performance Standard* (SPSPS) e no *Precise Positioning Service Performance Standard* (PPSPS), no entanto, os valores fornecidos

⁹ Adaptado de (Misra & Enge, 2011).

¹⁰ Adaptado de (Misra & Enge, 2011).

por estes documentos são muitos conservativos, sendo os desempenhos atuais no modo de operação, usualmente melhores do que esses valores oficiais (Nagle, 2009).

3.3.3.1. Performance dos Serviços GPS

Em geral, os padrões de desempenho do PPS estão em linha com os do SPS. Algumas vantagens do serviço PPS em relação ao serviço SPS são, o acesso a atualizações e correções rápidas das efemérides *Wide Area GPS Enhancements* (WAGE) e a utilização de dupla frequência para corrigir o atraso sofrido pelo sinal na sua transmissão, o que implica uma melhoria de desempenho significativa. Num recetor autónomo que utiliza os sinais recebidos dos satélites GPS em SPS, o rigor com um nível de confiança de 95% é (Grimes, 2008b):

- **Posicionamento horizontal:** 4 - 8 m;
- **Posicionamento vertical:** 10 - 15 m;
- **Tempo:** ~ 40 ns

3.3.3.2. Performance dos Serviços Combinados

Apesar da interoperabilidade com outros GNSS, técnicas mais avançadas, tais como o *Real Time Kinematic* (RTK) ou o *Precise Point Positioning* (PPP), podem providenciar desempenhos na ordem de alguns centímetros, existindo ainda outras formas de melhorar a solução de posicionamento como sistemas de aumento GNSS que asseguram a sua integridade ou através de DGNSS, melhorando a precisão para a ordem de 1 m (Rietdorf, Daub, & Loeff, 2006).

3.4. Futuro e Evolução

No decorrer dos anos 90, surgiram uma série de aplicações GPS civis e comerciais, e com estas, também outros sistemas GNSS começaram a surgir (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing, 2014). Com o intuito de manter a crescente demanda e manter-se competitivo internacionalmente, o governo americano comprometeu-se com um programa de modernização a longo prazo, visando melhorar o desempenho dos serviços GPS, incluindo maior robustez na resistência a interferências, atualizando os segmentos espacial e de controlo, com novos recursos, nos quais se incluem os novos sinais (Federal Aviation Administration, 2014d).

3.4.1. Segmento Espacial

Dado a constelação GPS ser uma mistura de novos e antigos satélites, a nova geração em desenvolvimento como parte do programa de modernização, inclui e incluirá os seguintes tipos de satélites (U.S. Air Force, 2006) (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015d):

- **Block IIR-M:** Parte de uma versão atualizada do *Block IIR*, estes satélites trouxeram melhorias, das quais se destacam, o segundo sinal civil L2C, para a melhoria do desempenho em aplicações comerciais, os dois novos sinais militares, oferecendo maior resistência a *jamming* e nível de potência flexível para sinais militares (Los Angeles Air Force Base, 2014a);
- **Block IIF:** Expandindo as capacidades do *Block IIR-M*, incluirá um total de doze satélites, dos quais dez se encontram já em órbita, que fornecerão precisão, intensidade de sinal e qualidade ao GPS. Para tal, as suas principais melhorias foram o acréscimo de um terceiro sinal civil L5 para responder ao requerimentos da navegação aérea e para a segurança de transportes e os relógios atômicos extremamente precisos para manter o tempo dentro de 8 bilionésimos de segundo por dia (Los Angeles Air Force Base, 2014b);
- **Block III:** Com prazo previsto para o primeiro lançamento em 2016, o *Block III* é o futuro dos satélites GPS, que irá fornecer sinais mais potentes, além duma maior fiabilidade do sinal, rigor e integridade para os serviços de precisão, navegação e tempo, dos quais se inclui o *Distress Alerting Satellite System* (DASS), para busca e salvamento e as ligações cruzadas, para o rápido comando e controlo e redução dos anos dos dados. Estando previsto inicialmente oito satélites, que trarão o quarto sinal civil L1C para interoperabilidade, e a extensão para 15 anos de vida útil do projeto. As futuras versões contarão com aumento das capacidades, para atender às demandas de utilizadores militares e civis (Los Angeles Air Force Base, 2014c).

3.4.2. Segmento de Controlo

No que diz respeito a este segmento, o novo *Operational Control Segment*, que substituirá o atual OCS, segundo a Raytheon, "*fornecerá segurança, precisão e*

fiabilidade na navegação e informação de tempo, para apoiar eficazmente utilizadores militares, civis e comerciais. Irá incluir suporte avançado de lançamento espacial, aumentando a consciência situacional para os operadores GPS e suporte para blocks de satélites futuros com capacidade avançadas para os novos sinais, capacidades NAVWAR e ligações de alta velocidade e transmissões de dados adicionais” (Colo Aurora, 2011). Estas capacidades NAVWAR permitirão uma proteção fidedigna por parte dos EUA e dos países aliados, contra interferências nos sinais GPS e minimizar a sua utilização por parte de forças hostis.

Com capacidades dedicadas, apoiará o planeamento avançado de missões do DoD, estando projetado em três fases (Los Angeles Air force Base, 2007):

- **Fase 0:** Lançamento dos satélites *Block III* e verificação e introdução de todas as capacidades do sinal de navegação L2C;
- **Fase 1:** Suporte da transição o novo OCS que iniciará o serviço em 2018;
- **Fase 2:** Apoiar, monitorizar e controlar sinais de navegação, incluindo L1C e L5.

3.4.3. Segmento de Utilizador

O primeiro passo para a modernização do GPS em termos deste segmento, iniciou-se formalmente em Maio de 2000, com a desativação do S/A pelo DoD, acabando com a degradação intencional do sinal, melhorando a precisão do GPS civil, em cerca de dez vezes, com benefício para os utilizadores civis e comerciais em todo o mundo (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing, 2012).

Em termos de melhorias para o futuro, a maioria dos novos sinais estão em fase gradual de implementação, com os novos satélites GPS lançados para substituir os antigos e serão de uso limitado até estes serem permutados dos 18 para os 24 satélites. Destinado a aperfeiçoar o desempenho dos utilizadores civis, o programa de modernização irá introduzir para utilização civil, os sinais L2C, L5 e L1C, como referido anteriormente e o sinal L1 C/A, continuamente transmitidos, para permitir um total de quatro sinais civis, da seguinte forma (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015a):

- **L1C:** Projetado para ser interoperável com o sistema Galileo, será compatível com o sinal civil atual L1 e inclui um projeto avançado para completar o seu desempenho em ambientes adversos. Outros sistemas de navegação por satélite

estão, igualmente, a adotar e projetar planos para transmissão deste sinal, como futuro padrão para a interoperabilidade internacional (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015a);

- **L2C:** Permitir o desenvolvimento de recetores de dupla frequência que corrijam o atraso ionosférico, conferindo maior fiabilidade, face às correções com a utilização de dois tipos de sinais (Fontana, Cheung, & Stansell, 2001). Com um poder efetivo maior que o do sinal L1 C/A, facilita a receção em condições mais adversas, estando a sua plena capacidade disponível, prevista para 2016 (Air Force Space Command, 2013);
- **L5:** Para futura transmissão destinada à segurança da aviação, combinado com o sinal L1 C/A, melhorará o rigor, através da correção ionosférica e a robustez, por meio da redundância. Fornecerá serviços aos utilizadores a nível global, aumentando o nível de receção em comparação com os existentes, não esquecendo da sua interoperabilidade com outros sistemas GNSS (Air Force Space Command, 2013).

3.4.4. Interoperabilidade

Com os novos e melhorados sistemas globais e regionais de navegação por satélite a emergirem, a interoperabilidade continua a ser a chave para o futuro do GNSS, daí a cooperação internacional em termos de navegação por satélite, ser uma prioridade para o governo americano, em termos bilateral com a Europa, Japão, Índia e Rússia, e em termos multilateral, com organizações como o *International Committee on Global Navigation Satellite Systems* (IGC), a *International Maritime Organization* (IMO), ou a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2015c) (Mai, International, 2012).

É desta forma, que o sistema GPS têm vindo a ser melhorado em cada um dos seus segmentos, de modo a garantir características técnicas apropriadas a este fim, como por exemplo, a inclusão dos novos sinais, para permitir reforçar a interoperabilidade.

Capítulo 4. *GLobalnaya NAVigationnaya Sputnikovaya Sistema*

O *GLobalnaya NAVigationnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pela antiga União Soviética, que utiliza uma constelação de satélites posicionada em órbitas do tipo MEO, projetado com o objetivo de fornecer serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo para utilizadores militares e civis, numa base contínua global, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (GLobal NAVigation Satellite System, *s.d.b*).

O desenvolvimento do GLONASS começou em 1976, com o objetivo de atingir uma cobertura global até 1991. Este sistema, operado pelo *Coordination Scientific Information Centre* (KNIT), do *Ministry of Defense of the Russian Federation*, é a segunda geração de sistemas de navegação por satélite russos, baseado no seu sistema anterior, *Tsikada*, para utilização militar (Oleynik, 2012). Desde 1996, por proposta da Federação Russa, o GLONASS passou a ser reconhecido pela IMO e pela ICAO (Russian Space Systems, 2015b).

A constelação de satélites esteve completamente preenchida em 1995, mas o sistema acabou por cair rapidamente em decadência devido ao colapso da economia russa e a substituição dos satélites já em órbita não ocorreu, tendo atingido o mínimo de oito satélites em 2001 (Encyclopedia Astronautica, *s.d.a*).

De forma a conseguir condições de desenvolvimento e trabalho ininterruptas, até 2008-2009, a Federação Russa conseguiu repor o mínimo de 18 satélites operacionais necessários em órbita, tendo apenas atingido a constelação completa de 24 satélites operacionais, no ano de 2012 ICAO (Russian Space Systems, 2015a).

4.1. Segmento Espacial

A constelação nominal base GLONASS é constituída no mínimo por 21+3 satélites operacionais (21 satélites ativos e 3 de reserva), distribuídos em 3 planos orbitais, perfazendo um total de 8 por cada um deles, com uma inclinação de 64.8° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 120° de plano para plano (NovAtel, *s.d.*). O sistema assegura uma boa cobertura nas latitudes polares, devido à elevada inclinação das suas órbitas, quando comparado com o GPS (GLobal NAVigation Satellite System).

Os satélites GLONASS operam em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade aproximada de 0.01° e um semieixo maior de 25510 km, correspondente a uma altitude de 19140 km, referente a uma MEO (GLobal NAVigation Satellite System, *s.d.b*). Os satélites possuem um período orbital de 11 h 15 m (11 h e 17 m siderais), o que significa que os satélites repetem a geometria a cada oito dias siderais (NovAtel, *s.d.*).

4.1.1. Constelação de Satélites

A qualidade e as técnicas de construção dos satélites GLONASS foi evoluindo, tal como a do GPS. Cada geração de satélites foi lançada ao longo de um determinado intervalo de tempo e com particularidades similares entre si, com as seguintes características (Federal Space Agency, *s.d.c*):

- **GLONASS, Uragan:** A primeira geração de satélites, enviada para a órbita entre 1982 e 2005, sendo que os primeiros enviados até 1985, referentes ao *Block I*, eram protótipos e foram projetados para durar apenas 1 ano. Os restantes, divididos nos *Block IIa*, *Block IIb* e *Block IIv*, com a diferença entre eles no tempo de vida útil, que variava entre os 2 e os 3 anos, apesar de muitos terem chegado aos 4, possuíam 3 eixos estabilizados, melhorando a transmissão da frequência e eram equipados para serem recolocados na constelação ICAO (Russian Space, 2015b).
- **GLONASS-M, Uragan-M:** A segunda geração de satélites, desenvolvida a partir de 1990, e com o primeiro a ser enviado para testes em 2001, tem um tempo de vida útil de 7 anos, como resultado do sistema de propulsão e das melhorias na estabilidade dos relógios. A característica mais marcante foi a inclusão de um segundo sinal civil na banda G2, para além da determinação mais precisa da órbita e de tentar alcançar a interoperabilidade com outros sistemas de navegação por satélite. No ano transato, a Rússia colocou em órbita um satélite desta geração, capaz de transmitir sinais na banda de frequência G3, ao contrário dos planos iniciais, em que esta apenas seria transmitida pelos satélites de terceira geração (Federal Space Agency, *s.d.b*) (Inside GNSS, 2014b).
- **GLONASS-K, Uragan-K:** A terceira geração de satélites, desenvolvida a partir de 2003, e com o primeiro a ser enviado para testes em 2011, terá um tempo de vida útil de 10 anos e um peso inferior aos restantes, o que permitirá o lançamento

de dois satélites em simultâneo. A característica mais marcante destes satélites será a inclusão de uma nova banda, passando o sistema a dispor de sinais de navegação adicionais nas frequências G1 e G2, para além de incluir sinais CDMA juntamente com os FDMA (Federal Space Agency, *s.d.c*).

4.1.2. Satélites de Navegação GLONASS

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação GLONASS, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

4.2. Segmento de Controlo

O segmento de controlo GLONASS é constituído por seis grandes subsistemas, o *System Control Center* (SCC), uma rede de cinco *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C), três *Uplink Station* (ULS), e uma rede de quatro *Monitor Station* (MS) com mais seis adicionais, duas estações *Central Clock* (CC-M) e duas *Laser Tracking Station* (SLR), responsável pelo funcionamento apropriado do sistema, à semelhança do GPS (GLObal NAVigation Satellite System, *s.d.b*).

Uma desvantagem neste segmento, quando comparado com o GPS, reside na falta de uma cobertura global de estações terrestres do sistema GLONASS, a qual poderá causar atrasos na deteção de anomalias existentes nos satélites, e inviabiliza que a atualização de dados seja mais consistente.

4.2.1. System Control Centre

Localizada em Krasnoznamensk, o SCC providencia a função de telemetria, telecomando e controlo, processa as medições recebidas pelas TT&C, sendo responsável por todos os aspetos de controlo e gestão da constelação de satélites (United Nations, 2010).

4.2.2. Command and Tracking Station

Compostas por uma rede principal de cinco estações TT&C, distribuídas por todo o território russo, a CTS (*Command and Tracking Station*), acompanha e adquire continuamente dados de todos os satélites visíveis a partir das suas localizações (GLObal NAVigation Satellite System, *s.d.b*). Os dados obtidos são então enviados para o SCC, onde são processados para estimar as órbitas e os erros de relógio dos satélites, para gerar a mensagem de navegação e outros parâmetros do sistema (Encyclopedia Astronautica,

s.d.a). Após estes procedimentos, os dados são transmitidos para os satélites, através das ULS, da mesma forma que permutam informação de controlo aos mesmos.

4.2.3. Laser Range Station

Face à alta precisão dos alcances laser, a utilização das SLR, como fonte única de calibração de dados na determinação das efemérides, proporcionam a solução de problemas de estimativa da precisão e calibração das radiofrequências principais para medição da órbita, monitorização dos relógios de bordo e utilização de dados para controlo operacional do tempo e das efemérides, e ainda, usar as coordenadas dessas estações como base de referência geodésica do GLONASS (Baryshnikov, Shargorodsky, & Vasiliev, 2010).

4.3. Segmento de Utilizador

Uma vez o sinal adquirido e iniciado o seu seguimento pela antena, o recetor descodifica a mensagem de navegação e estima a posição do utilizador, de uma forma semelhante à descrita anteriormente para um recetor genérico (United Nations, 2010).

4.3.1. Serviços

O GLONASS fornece serviços, através de sinais de navegação *Standard Precision* (SP) e *High Precision* (HP), com recurso respectivamente, ao *Channel Standard Accuracy* (CSA) e ao *Channel High Accuracy* (CHA) (Roßbach, 2000).

Durante uma cimeira decorrida no ano de 2005, entre o primeiro-ministro indiano Manmohan Singh e o presidente russo Vladimir Putin, foi acordado que a Índia iria repartir alguns custos de desenvolvimento da terceira geração de satélites, em troca do acesso ao sinal HP (India Post, 2010). Assim, em 2010, foi assinado o acordo de partilha, colocando a Índia como o país pioneiro com o acesso ao sinal militar GLONASS.

4.3.1.1. Standard Precision

O sinal do serviço SP, projetado para o uso civil, também conhecido pelo código C/A, era transmitido inicialmente apenas na banda G1, porém, com a modernização do sistema GLONASS, mais propriamente com lançamento da segunda geração de satélites, esta trouxe um segundo sinal civil na banda G2, que permite anular a refração ionosférica (Roßbach, 2000). Atualmente, com o primeiro satélite de terceira geração já em órbita,

com um terceiro sinal civil na banda G3, está também disponível para este serviço, para os utilizadores civis.

4.3.1.2. *High Precision*

O sinal do serviço HP, é transmitido em ambas as bandas G1 e G2, em quadratura de fase com o sinal SP, partilhando a mesma portadora. Mais conhecido pelo código P (*Precision*), uma vez que se trata de um código especial modulado, disponibilizado para utilizadores militares/autorizados, os operadores do sistema reservam o direito de o alterarem no futuro, caso seja necessário (Langley, 2011).

4.3.2. Configuração do Sinal

O GLONASS utiliza a técnica FDMA para enviar os sinais atuais em frequências diferentes, e o método de modelação BPSK para ambas as bandas L1 e L2, também designadas G1 e G2 (Ávila Rodríguez, 2008).

A banda G1 GLONASS, tal como a GPS, é a mais importante para fins da navegação. Existem atualmente dois sinais transmitidos pelo GLONASS nesta banda, a G1 do código C/A e a G1 do código P, e futuramente contará com novos sinais para esses mesmos códigos (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	C/A	P	C/A	P
Frequência central	1598 – 1606 MHz	1593 – 1610 MHz	1600,995 MHz	1575.42 MHz
Banda Frequência	G1			
Técnica de acesso	FDMA		CDMA	
Componente do sinal	Dados	Dados	Dados	Dados
Modulação	BPSK (0.511)	BPSK (5.11)	BPSK (1)	BOC (5, 2)
Frequência do código	0.511 MHz	5.11 MHz	1.023 MHz	2.046 MHz
Tipo Serviço	SP	HP	SP	HP
Velocidade dos dados	50 bps	50 bps	50 bps	50 bps

Tabela 4.1 – Características do sinal G1 GLONASS.¹¹

A banda G2 GLONASS transmitida, inicialmente apenas pelo serviço HP, e posteriormente, pelo serviço SP com a segunda geração de satélites GLONASS, permitiu obter uma determinação mais precisa das órbitas, anular a refração ionosférica, para além

¹¹ Adaptado de (NovAtel, s.d.).

de ter “aberto portas” para a interoperabilidade com outros sistemas. Comparado com o sinal G1, também esta possui dois sinais transmitidos nesta banda, para o código C/A e P. Futuramente contará também, tal como o G1, com novos sinais para ambos códigos, com a geração de satélites *GLONASS-KM* (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	C/A	P	C/A	P
Frequência central	1242 - 1249 MHz	1237 – 1254 MHz	1248.06 MHz	
Banda Frequência	G2			
Técnica de acesso	FDMA		CDMA	
Componente do sinal	Dados	Dados	Dados	Dados
Modulação	BPSK (0.511)	BPSK (5.11)	BPSK (1)	BOC (5, 2)
Frequência do código	0.511 MHz	5.11 MHz	1.023 MHz	2.046 MHz
Tipo Serviço	SP	HP	SP	HP
Velocidade dos dados	50 bps	50 bps	50 bps	50 bps

Tabela 4.2 – Características do sinal G2 GLONASS.¹²

A banda GLONASS G3 foi transmitida pela primeira vez pelos satélites *GLONASS K*, pelo serviço SP, com a frequência modulada em quadratura de fase em dois canais, o canal de dados e o canal piloto, e posteriormente será também transmitida no serviço HP. A configuração do sinal, de entre os quatro cenários possíveis, é expectável que seja a referida na tabela abaixo (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	C/A	P
Frequência central	1202,025 MHz	1207,14 MHz
Banda Frequência	G3	
Técnica de acesso	CDMA	
Componente do sinal	Dados	Dados
Modulação	QPSK (10)	QPSK (10)
Frequência do código	10.23 MHz	
Tipo Serviço	SP	HP
Velocidade dos dados	100 bps	100 bps

Tabela 4.3 – Características do sinal G3 GLONASS.¹³

¹² Adaptado de (NovAtel, s.d.).

¹³ Adaptado de (NovAtel, s.d.).

4.3.3. Performance

Ao contrário do GPS, que dispõe de informação dos níveis de desempenho, para o GLONASS não existe nenhum documento que esclareça sobre os seus serviços, porém a comparação da precisão fornecida pelo SDCM, mostrou que este é ligeiramente menos rigoroso que o GPS (Russian System of Differential Correction and Monitoring, 2015).

4.3.3.1. Performance dos Serviços GLONASS

Ainda que os desempenhos a nível de disponibilidade sejam insatisfatórios, dado o reduzido número de satélites, juntamente com o seu segmento de controlo, que era delimitado apenas ao território russo, com a modernização de ambos os segmentos, incluindo novas estações de monitorização, algumas delas fora da Rússia e, o aumento do número de satélites na constelação, levaram a uma cobertura quase global e uma disponibilidade total no território russo (Sputnik News, 2015).

A nível de rigor, e já com o seu próprio sistema de aumento disponível desde 2012, o SDCM, o rigor progrediu em relação à existente até à altura, passando para os seguintes valores num recetor autónomo GLONASS em SP com um nível de confiança de 95% (Alexey, 2014):

- **Posicionamento horizontal:** 5 - 9 m;
- **Posicionamento vertical:** 10 - 15 m;
- **Tempo:** ~ 40 ns.

4.3.3.2. Performance dos Serviços Combinados

Utilizando o GLONASS combinado com o GPS, face ao aumento do número de satélites operacionais, torna-se relevante em termos de disponibilidade, principalmente em ambientes urbanos, onde a presença de grandes edifícios conduz frequentemente à sombra do sinal, culminando num maior rigor no posicionamento (GLobal NAVigation Satellite System, *s.d.a*).

Para além do referido, a combinação dos sistemas independentes irá conduzir a um nível exigido de redundância, para aplicações que requerem uma solução de *backup* total, protegendo-as no caso do sistema principal falhar.

4.4. Futuro e Evolução

O governo da Federação Russa, reconhecendo o sistema de navegação por satélite como uma prioridade, aprovou em 2001 um programa no âmbito dos *Global Navigation System* (GNS), com o objetivo de melhorar a arquitetura do sistema GLONASS (Russian Federation, 2003).

Atualmente, o objetivo do programa é garantir que os desempenhos sejam semelhantes aos do GPS, colmatando os fatores que o impedem de atingir esse ponto ICAO (Russian Space, 2015a). Com um projeto aprovado até 2020, o sistema está programado para ter todos os satélites a transmitirem tanto os novos sinais, como os já existentes.

4.4.1. Segmento Espacial

A modernização do segmento espacial GLONASS começou com a segunda geração de satélites e o seu desenvolvimento daqui em diante, inclui e incluirá o seguinte:

- **GLONASS-M, Segunda Geração:** Enviado para a órbita para substituir os satélites mais antigos, dispõe de bytes reservados na mensagem de navegação para fornecer divergências de escalas de tempo do GPS e GLONASS, autenticidade válida no âmbito da navegação e duração da informação dos dados ICAO (Russian Space, 2015c). Os novos filtros instalados nestes satélites permitirão a redução das emissões *out-of-band* e o aumento da estabilidade dos relógios de bordo;
- **GLONASS-K, Terceira Geração:** Transmitirão novos sinais civis, para além dos atuais em FDMA, nas bandas G1 e G2 e, com a integridade de informação GNSS transmitida num terceiro sinal civil e global, G3, com efemérides diferenciais e correções de tempo, ambos com recurso à técnica CDMA ao contrário dos restantes sinais (GLobal NAvigation Satellite System, *s.d.b*);
- **GLONASS-KM, Quarta geração:** Programado para ser enviado para a órbita para depois de 2017, estes novos satélites poderão também transmitir novos sinais CDMA na banda G1 e G5 e sinais FDMA na banda G3, trazendo vantagens a nível do tempo de vida útil e da potência do sinal ICAO (Russian Space, 2015d).

Está ainda a ser estudada a alternativa para a presente constelação com os seus três planos orbitais igualmente espaçados, mas que exigiria que os sinais FDMA fossem desligados.

4.4.2. Segmento de Controle

O desenvolvimento gradual das capacidades de acompanhamento GLONASS, seguidas pelo crescimento constante do número de satélite, teve uma influência bastante positiva no rigor e desempenho do sistema, levando assim o governo russo, a projetar a implementação de quinze novas estações de referência, seis delas fora do território russo (GPS World Staff, 2011). A primeira situar-se-á na Antártida permitindo um maior comando e controle da constelação de satélites e permitirá melhorar a qualidade do serviço de posicionamento atingida no território russo a nível global (Russian Insider, 2015).

4.4.3. Segmento de Utilizador

Embora a constelação deste sistema permita já a cobertura global, a sua comercialização, especialmente a nível do segmento de utilizador, carece em comparação com o sistema GPS. Para reverter esta situação, o governo russo tem promovido ativamente o sistema para utilização civil, sendo de destacar a sua utilidade em todo o tipo de transportes, terrestres, navais e aéreos.

O GLONASS será utilizado para a cobrança de taxas e assistências rodoviárias e os veículos, vendidos na Federação Russa, contarão com um sistema de acompanhamento, conhecido por projeto ERA-GLONASS, que funcionará como “caixa negra”, com capacidade para os alertar centros de emergência em caso de acidente, indicando a posição precisa dos veículos envolvidos (NIS GLONASS, *s.d.*).

A nível dos sinais recebidos pelos recetores, normalmente em duas bandas, G1 e G2, estes utilizam a técnica de FDMA ao contrário de todos os outros sistemas GNSS, que utilizam o CDMA (Russian Institute of Space Device Engineering, 2008).

Com o objetivo de providenciar uma melhoria do rigor, resistência ao multi-trajetos e especialmente uma melhor interoperabilidade com outros sistemas, os novos satélites GLONASS-K, transmitirão quatro sinais adicionais, do tipo CDMA, dois dos quais, localizados na banda G1 e G2 para utilizadores militares, e os outros dois, nas bandas G1 e G3 para utilizadores civis (Inside GNSS, 2011).

Este novo sinal, o G3, permitirá ao sistema ter um total de três sinais civis, com a vantagem de estar centrado na mesma frequência dos sinais E5b Galileo e BeiDou, na

região atribuída ao *Aeronautical Radio Navigation Service* (ARNS). Esta banda é adequada para aplicações de salvaguarda da vida humana, dado que nenhum outro utilizador terá autorização para operar nesta frequência (Langley, 2011).

É espectável que a quarta geração de satélites deste sistema poderá vir a trazer e a transmitir na frequência G5, tal como o modernizado sinal L5 GPS e E5a Galileo (Inside GNSS, 2010).

4.4.4. Interoperabilidade

Com o objetivo de melhorar a interoperabilidade com outros sistemas, o sistema de coordenadas GLONASS foi alterado para o padrão de referência internacional, o ITRS, tendo a informação das efemérides no novo sistema de referência, o PZ-90.11, sido implementada, em todos os satélites GLONASS operacionais a partir do fim do ano de 2013, passando a transmitirem neste sistema ECEF (Federal Space Agency, 2014).

Capítulo 5. *Galileo*

O *Galileo* é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pela União Europeia e a cargo da *European Space Agency* (ESA), que utiliza uma constelação de satélites posicionada em órbitas do tipo MEO, projetado com o objetivo de fornecer serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo para utilizadores militares e civis, numa base contínua global, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (European Space Agency, 2014d).

Já em 1990, a União Europeia tinha identificado a necessidade de a Europa ter o seu próprio sistema de navegação global por satélite (Official Journal of the European Communities, 1999). A determinação em construir um, foi feita com o mesmo espírito que as decisões tomadas na década de 1970, tais como o *Ariane* e o *Airbus*.

Com o nome deste sistema a aparecer pela primeira vez em 1999, altura a partir da qual o programa tem vindo a ser desenvolvido para atingir a capacidade operacional plena, o *Galileo*, que será interoperável com o sistema americano GPS e com o sistema russo GLONASS, fornecerá o posicionamento em tempo real, com rigor ao nível dos metros (European Space Agency, 2014f). O sistema garantirá a disponibilidade do serviço, mesmo em circunstâncias mais extremas e informará os utilizadores, no caso de perda de sinal de um dos satélites (European Space Agency, 2014f).

5.1. Segmento Espacial

A constelação nominal base *Galileo* será constituída por 27+3 satélites operacionais (27 satélites ativos e 3 de reserva), distribuídos em 3 planos orbitais, perfazendo um total de 10 por cada um deles, com uma inclinação de 56° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 120° de plano para plano. Existirá uma reposição da posição do satélite em cada plano orbital, e, tal como o GLONASS, assegurará uma boa cobertura nas latitudes polares, em vantagem relativamente ao GPS (European Space Agency, 2014d).

Os satélites *Galileo* operarão em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade aproximada de 0.01° e um semieixo maior de 29600 km, correspondente a uma altitude de 23222 km, referente a uma MEO (European Space Agency, 2014f). Os satélites possuirão um período orbital de 14 h 05 m (14 h 07 m siderais), o que significa

que os satélites repetem a geometria a cada dez dias siderais (European Space Agency, 2014d).

5.1.1. Constelação de Satélites

A construção da constelação dos satélites Galileo, tem vindo a ser realizada de forma faseada. Os satélites já lançados apresentam as seguintes características:

- **Satélites GIOVE:** Os primeiros destes satélites, foram enviados para a órbita em 2005 e 2008, respetivamente, como satélites experimentais que transmitiam na frequência E1, e tiveram o objetivo de caracterizar a órbita e avaliar o desempenho do sistema, reduzindo o risco associado ao lançamento dos quatro seguintes Galileo *In-Orbit Validation* (IOV) (European Commission, 2013b).
- **Galileo-IOV:** Os primeiros destes satélites foram enviados para a órbita, entre 2011 e 2012, compreendendo a constelação inicial e transmitindo sinais nas bandas E1, E5 e E6. A primeira posição calculada, com recurso a estes satélites, foi conseguida em 2013, mostrando o bom desempenho do sistema, que poderá ser melhorado, à medida que mais satélites vão sendo colocados em operação (European Space Agency, 2014b) (European Commission & European Space Agency, 2002);
- **Galileo-FOC:** Os primeiros destes satélites *Full Operational Capability* (FOC), foram enviados para a órbita em 2014 e 2015, com o objetivo de atingir um sistema completo, composto pelos 30 satélites do sistema. Com esta fase, iniciar-se-á a *Initial Operational Capability* (IOC) e, atingirão os 18 satélites em órbita, para que possam ser fornecidos os serviços *Open Service*, *Search and Rescue* e *Public Regulated Service* para a comunidade internacional (European Commission, 2013b) (European Commission & European Space Agency, 2002).

5.1.2. Satélites de Navegação Galileo

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação Galileo, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

5.2. Segmento de Controlo

O segmento de controlo Galileo é constituído por dois grandes sistemas redundantes, o *Galileo Control Segment* (GCC), cada um dos quais, composto por um *Galileo Control Segment* (GCS) e por um *Galileo Mission Segment* (GMS), para além de uma rede global de cinco *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C), uma rede de trinta *Galileo Sensor Stations* (GSS) e cinco *Uplink Station* (ULS), responsável pelo funcionamento apropriado do sistema (European Space Agency, 2014c).

A interligação das estações remotas ULS, GSS e TT&C, com o GCC é realizada através de uma rede de comunicação híbrida, composta por diferentes sinais rádio padrão e especiais, garantindo a comunicação entre todos os locais (European Space Agency, 2014c).

5.2.1. Galileo Control System

Localizadas em Fucino, na Itália, e Oberpfaffenhofen, na Alemanha, o GCS providencia a função de telemetria, telecomando e controlo, processa as medições recebidas pelas TT&C e orienta todos os aspetos de controlo e gestão da constelação de satélites (European Space Agency, 2007a).

5.2.2. Galileo Mission System

O GMS é responsável pela determinação e fornecimento de mensagens de dados de navegação, necessárias para facultar serviços de navegação e tempo, utilizando para isso uma rede global de GSS para monitorizar os sinais de navegação de todos os satélites de forma contínua, de duas formas independentes (European Space Agency, 2007a). A primeira função, a *Orbitography Determination and Time Synchronization* (OD&TS), processa os dados observados de todos os satélites e calcula a órbita e o erro do relógio dos satélites. A segunda disponibilizará os resultados destes cálculos para os satélites, utilizando um contacto programado com uma rede global de cinco ULS (European Space Agency, 2014c).

5.3. Segmento de Utilizador

Foram desenvolvidos três tipos de recetores no âmbito do programa Galileo: os recetores-teste, os recetores para os sinais transmitidos pelos primeiros satélites e os recetores para a constelação operacional Galileo, tendo em vista a abordagem de

diferentes necessidades do processo de desenvolvimento do sistema, que abrange uma diversidade de sinais e serviços (European Commision, 2014).

Os objetivos da parte inicial da fase de projeto para o segmento de utilizador de teste foram plenamente alcançados, tendo sido construído um protótipo de recetor, com a capacidade de receber todos os componentes do sinal Galileo dos satélites, que resultou na viabilidade de aquisição e acompanhamento dos novos sinais (Zourek, 2010).

5.3.1. Serviços

Tal como o GPS e o GLONASS, também o Galileo transmitirá em cada uma das três frequências num código modulado para observação da pseudo-distância, utilizando a técnica CDMA, oferecendo cinco serviços, de forma a abranger as várias necessidades dos utilizadores civis e militares (European Commision, 2014).

Existirão algumas funções decorrentes da utilização combinada do Galileo com outros sistemas, para além dos serviços prestados de forma autónoma, sendo por isso, classificado em quatro categorias (Zourek, 2010):

- Os serviços exclusivos dos satélites Galileo, os quais se descrevem nas subsecções seguintes;
- Os serviços assistidos localmente com recurso a estações de referência locais, à semelhança do DGPS;
- O serviço de aumento, com recurso ao EGNOS, de modo a melhorar a precisão do serviço livre fornecido pelo sistema resultante do programa Galileo, tal como faz com o GPS;
- Os serviços combinados com recurso a outros sistemas, fornecidos por sistemas de navegação ou comunicação existentes.

5.3.1.1. *Open Service*

O *Open Service* (OS), será um serviço de utilização livre, resultante de um conjunto de sinais, que fornecerá informação de posicionamento e de tempo, com um desempenho competitivo em comparação com outros sistemas GNSS (European Commision, 2014). Este serviço estará disponível, para aplicações do mercado em massa, tais como telemóveis, PDA's ou veículos automóveis (European Space Agency, 2010a);

5.3.1.2. *Safety of Life*

O serviço *Safety of Life* (SoL) visa melhorar o desempenho do OS, transmitindo informação de integridade, ou seja, alertas em tempo real, quando não se consiga cumprir determinadas margens de rigor. Será disponibilizado para aplicações críticas, com requisitos de segurança, tais como a navegação marítima em águas restritas e navegação aérea (European Space Agency, 2010a);

5.3.1.3. *Commercial Service*

O *Commercial Service* (CS) oferecerá valores mais elevados na velocidade dos dados obtidos e levará a um maior nível de rigor, através do acesso a dois sinais adicionais encriptados, necessitando para tal de ser pago pelo utilizador. Este serviço destina-se a aplicações de uso profissional e comercial (European GNSS Agency, 2014e);

5.3.1.4. *Public Regulated Service*

O *Public Regulated Service* (PRS), permitirá determinar a posição e o tempo dos utilizadores que requeiram uma elevada integridade do serviço, com acesso controlado (European Space Agency, 2010a). Para tal, os sinais serão modulados e encriptados, de modo a fornecer capacidades *anti-jamming*. Este serviço dirigirá-se a utilizadores autorizados pelo governo, para aplicações destinadas principalmente à segurança, defesa e infraestruturas estratégicas (European Commision, 2013);

5.3.1.5. *Search and Rescue*

O último dos serviços, o *Search and Rescue* (SAR) possibilitará, juntamente com outros sistemas de posicionamento por satélite, localizar emergências, captando os sinais de socorro transmitidos por navios, aviões ou pessoas e reenviá-los para os centros de busca e salvamento nacionais, localizando de forma rigorosa o acidente. Este serviço que contribuirá para o esforço cooperativo internacional COSPAS-SARSAT sobretudo em atividades humanitárias de busca e salvamento, sendo uma parte importante, enquanto *Medium Earth Orbit Search and Rescue* (MEOSAR) (European GNSS Agency, 2014d).

5.3.2. Configuração do Sinal

O Galileo utilizará a técnica CDMA para enviar os diferentes sinais na mesma frequência com o método de modelação CBOC para a banda E1 do serviço OS no canal

de dados e no canal piloto, o método BPSK para a banda E6 do serviço CS e o método BOC para as bandas E6 e E1 ambas do serviço PRS (Ávila Rodríguez, 2008).

A banda E1 Galileo, que recebeu durante algum tempo o nome de banda L1, em analogia com o GPS, será também ela, a mais importante para fins da navegação. O sinal transmitido pelo Galileo em E1 consistirá em três componentes, a E1 OS com o canal de dados e o canal piloto e a E1 PRS (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	E1a	E1b	E1c
Frequência central	1575,42 MHz		
Banda Frequência	E1		
Técnica de acesso	CDMA		
Componente do sinal	Dados	Dados	Piloto
Modulação	$\text{BOC}_{\cos}(15,2.5)$	MBOC (6,1,1/11)	
Frequência do código	2.5575 MHz	1.023 MHz	
Tipo Serviço	PRS	OS/ CS/ SoL	
Velocidade dos dados	N/A	125 bps	-

Tabela 5.1 – Características do sinal E1 Galileo.¹⁴

A banda E6, que será utilizada para o PRS e para o CS, terão por detrás, a ideia de gerar um conjunto de códigos que preencherá as propriedades de aleatoriedade sempre que possível, sendo constituído por três componentes, da E6 CS com o canal de dados e o canal piloto e da E6 PRS (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	E6a	E6b I	E6b Q
Frequência central	1278,75 MHz		
Banda Frequência	E6		
Técnica de acesso	CDMA		
Componente do sinal	Data	Data	Piloto
Modulação	BOC _{cos} (10,5)	BPSK (5)	
Frequência do código	5.115 MHz		
Tipo Serviço	PRS	CS	
Velocidade dos dados	N/A	500 bps	-

Tabela 5.2 – Características do sinal E6 Galileo.¹⁵

¹⁴ Adaptado de (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

¹⁵ Adaptado de (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

A banda E5, será modulada em AltBOC, uma modulação muito semelhante a dois sinais BPSK, em que os códigos primários podem ser gerados, com registos de deslocamento, sendo composto por quatro componentes, da E5a e da E5b, ambos com o canal de dados e o canal piloto (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	E5a I	E5a Q	E5b I	E5b Q
Frequência central	1191,795 MHz			
Banda Frequência	E5			
Técnica de acesso	CDMA			
Componente do sinal	Dados	Piloto	Dados	Piloto
Modulação	AltBOC (15,10)			
Frequência do código	10.23 MHz			
Tipo Serviço	OS		OS/ CS/ SoL	
Velocidade dos dados	25 bps	-	125 bps	-

Tabela 5.3 – Características do sinal E5 Galileo.¹⁶

5.3.3. Performance

O desempenho do sistema Galileo será diferente consoante o serviço disponibilizado. Através do OD&TS, que também é o indicador de desempenho da qualidade do sinal *Signal-in-Space Accuracy* (SISA), acionará diretamente os serviços de integridade do Galileo (European Space Agency, 2014f).

Para além disso, o *Signal-in-Space Monitored Accuracy* (SISMA), é necessário para a monitorização de integridade dos serviços e do estado dos GMS existentes, que são definidos por este e relacionados com o desempenho máximo do sistema (Oehler *et al.*, 2009).

5.3.3.1. Performance dos Serviços Galileo

Tal como referido acima, os desempenhos do sistema Galileo, diferem consoante o tipo de serviço. No caso do OS, o principal serviço a ser fornecido pelo sistema, que tanto servirá para utilizadores civis como militares, não terá quaisquer requisitos de integridade específicos aplicáveis, sendo os desempenhos de rigor para recetores de dupla frequência, com um nível de confiança de 95%, os seguintes (European Space Agency, 2014a):

¹⁶ Adaptado de (Subirana, Zornoza, & Hernández Pajares, 2013).

- **Posicionamento horizontal:** ~ 4 m;
- **Posicionamento vertical:** ~ 8 m;
- **Tempo:** ~ 30 ns.

Quanto ao PRS, cuja disponibilidade do serviço será de acesso controlado pelo *Commercial Service Providers*, sofrerá ainda alterações conforme as decisões tomadas sobre os serviços oferecidos, como por exemplo, a integridade de dados ou correções diferenciais para áreas locais, que dependerão das características de outros serviços do Galileo. No entanto, é de esperar o seguinte rigor de posicionamento para este serviço, com nível de confiança de 95% (Oehler *et al.*, 2009):

- **Posicionamento horizontal:** ~ 6.5 m;
- **Posicionamento vertical:** ~ 12 m;
- **Tempo:** ~ 100 ns.

5.3.3.2. Performance dos Serviços Combinados

Os sistemas mais óbvios a serem combinados com Galileo são os outros sistemas GNSS existentes, que como ele, compartilham muitas características que facilitam a combinação a nível de utilizador.

Utilizando o Galileo combinado com outros GNSS, face à subida do número de satélites operacionais, tornar-se-á relevante em termos de disponibilidade, principalmente em ambientes urbanos, devido às edificações dando origem à sombra do sinal, levando ainda, a uma melhor precisão no posicionamento (European GNSS Agency, *s.d.c*) (European Commission & European Space Agency, 2002).

5.4. Futuro e Evolução

O programa Galileo, fornecerá e garantirá serviços de navegação e posicionamento globais autónomos, altamente precisos, para além de ser interoperável, com outros sistemas GNSS, como o GPS e o GLONASS (European Space Agency, 2014g).

O *Galileo Evolutions* tem atualmente em estudo, no âmbito do *European GNSS Evolution Programme* (EGEP), a definição de objetivos e preparação da tecnologia para versões futuras, desenhar novas ferramentas do sistema, melhorar o conhecimento na

monitorização do desempenho GNSS e dos fatores que influenciam o desempenho, e ainda, promover e apoiar a exploração científica do Galileo (European Space Agency, 2015).

5.4.1. Arquitetura do Sistema

O programa Galileo tem sido estruturado de acordo com as seguintes fases:

- **Galileo-IOV (*In-Orbit Validation*):** Esta fase consistiu na qualificação do sistema, através de testes e da operação de dois satélites experimentais e de uma constelação de quatro pseudo-satélites numa infraestrutura terrestre, a qual já se encontra completa desde 2014, com resultados a mostrarem o bom funcionamento e desempenho do sistema (GPS World Staff, 2014b). O IOV tem por objetivo avaliar o desempenho dos satélites. Estes fornecem um SIS experimental, garantindo o espectro de frequências necessário, ao transmitirem nas bandas E1, E5 e E6 (European Commission & European Space Agency, 2002). Em 2014, o Galileo alcançou o IOV, com os resultados a mostrarem o bom funcionamento dos satélites e desempenho do sistema (European Space Agency, 2014a);
- **Galileo-IOC (*Initial Operational Capability*):** Esta fase será uma tarefa parcial do segmento terrestre e espacial, que prestará os serviços OS, SAR e PRS e cuja aquisição inclui o primeiro conjunto de satélites (14 satélites ativos + 4 IOV existentes), a infraestrutura terrestre de missão e controlo, os serviços de suporte do sistema e as operações análogas (European Commission, 2013b);
- **Galileo-FOC (*Full Operational Capability*):** Esta fase consistirá na implementação de um sistema completo gerido pela Comissão Europeia, composto pelos 30 satélites, centros de controlo localizados na Europa e uma rede de estações de sensores e de transmissão instaladas em todo o globo terrestre (European Commission, 2013b). O FOC Galileo deverá ser alcançado em 2019/2020, numa fase de abordagem desde a fase IOC (GPS World Staff, 2015).

O projeto Galileo obteve autorização de utilização de frequências numa parte dedicada da banda C, no entanto, devido a complexidades técnicas, foi impossível a sua utilização. Caso consiga resolver esses problemas, esta banda poderá vir a ser reservada para aplicações militares, deixando a banda L apenas para aplicações civis (Hein *et al.*, 2007).

5.4.2. Interoperabilidade

O sistema Galileo será interoperável com GPS e GLONASS, possibilitando a um utilizador, ser capaz de adquirir a posição com o mesmo recetor de qualquer um dos satélites GNSS, em qualquer combinação que seja determinada para esse recetor (European GNSS Agency, *s.d.c*).

A Comissão Europeia está em processo de criação de um grupo consultivo de especialistas em GNSS designado por *Mission Evolution Advisory Group* (MEAG), que tem como objetivo fornecer aconselhamentos independentes e recomendações, sobre possíveis evoluções dos objetivos da missão e definições de serviço para os programas europeus de navegação por satélite Galileo e EGNOS (European GNSS Agency, *s.d.b*). O grupo deverá avaliar as mudanças das necessidades do utilizador e alcances baseados no SIS, tanto em escala europeia, como internacional. As mudanças nos requisitos de missão e de serviço para o programa Galileo e EGNOS serão também analisadas, propondo atualizações adequadas (European GNSS Agency, *s.d.c*).

Capítulo 6. *BeiDou*

O *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS ou BeiDou) é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pelo Governo Chinês, que utiliza uma constelação de satélites posicionada em órbitas do tipo GEO, MEO e IGSO, para fornecer serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo para utilizadores militares e civis numa base contínua global, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (Liu, 2013).

A China começou a construir e desenvolver o seu próprio GNSS em 1980, com o nome *Compass* (BeiDou em chinês). Tendo decidido desenvolver um sistema de navegação por satélite, iniciou por um serviço complementar regional, desenvolvendo posteriormente, para um serviço global, através de uma estratégia que assenta em três etapas, a experimental, a de desenvolvimento do sistema regional, e por último do sistema global (China Satellite Navigation Office, 2013b). Em 2013, o BeiDou deu a conhecer, a nível de controlo de interface, como se forma o sinal civil e outras informações relativas ao sistema, escala de tempo e descrição de dados para calcular a posição dos satélites (Dingding, 2011).

Com o desenvolver deste sistema, em 2014, tornou-se parte do *World-Wide Radionavigation System* (WWRNS), através da divulgação dessa informação na 94ª reunião do *Maritime Safety Committee International*, pelo subcomité *Navigation, Communications and Search and Rescue* (NCSR) da IMO, que aprovou o sistema atendendo ao desempenho dos seus recetores de teste instalados em navios (International Maritime Organization, 2014).

6.1. Segmento Espacial

A constelação nominal base BeiDou será constituída por 5 satélites GEO e 30 non-GEO, distribuídos em 7 planos orbitais, com uma inclinação de 55° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 118° de plano para plano (He *et al.*, 2013). Dos 30 satélites non-GEO, 27 estarão em MEO, dos quais 3 serão satélites de reserva, distribuídos por três planos orbitais e os restantes 3 em IGSO, distribuídos por outros 3 planos orbitais distintos (Liu, 2013). Quanto aos 5 satélites GEO, encontrar-se-ão ambos, distribuídos no mesmo plano orbital, perpendiculares ao equador (BeiDou Navigation Satellite System, *s.d.d*).

Os satélites BeiDou operarão em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade inferior a 0.01° e um semieixo maior 27878 km e 42164 km, correspondentes a uma altitude de 21500 km e 36000 km, referente a uma MEO e uma GEO/IGSO respetivamente (GPS World Staff, 2013b). Os satélites possuirão um período orbital de 12 h 53 m (12 h e 55 m siderais), o que significa que os satélites repetem a geometria a cada sete dias siderais (He *et al.*, 2013).

6.1.1. Constelação de Satélites

Em Dezembro de 2011, foi oficialmente declarado o Serviço de Operação Inicial para a prestação inicial de serviços de posicionamento de navegação e de tempo para a área da China (GPS World Staff, 2013b).

O desenvolvimento dos satélites BeiDou, tem vindo a ser realizada com o tempo, de forma a conseguir atingir a constelação operacional em 2020. Deste modo, e já na última fase de lançamento, os satélites que se encontram em órbita, apresentam diferenças entre os vários tipos existentes:

- **BeiDou-1:** Incluídos na fase experimental, foram enviados para a órbita a partir de 2000, com o *BeiDou-1A*, tendo o terceiro satélite, *Beidou-1C* atingido a órbita em 2003. Em 2007, o quarto e último deste tipo de satélite do sistema, *Beidou-1D* foi enviado para o espaço, como satélite de reserva, o que significou que o estabelecimento do sistema de navegação Beidou-1, ficou assim completo. Com o objetivo de abranger apenas a área do território chinês, devido a estes satélites serem GEO, o seu bom funcionamento permitiu ao sistema arrancar para a próxima fase, tendo estes já sido retirados em 2012 (He *et al.*, 2013);
- **BeiDou-2, Primeira Geração:** Esta geração incluirá a constelação operacional, de forma a cobrir uma área global, e transmitirá nas bandas B1, B2 e B3. O primeiro satélite, *Compass-M1*, foi lançado em 2007. Em 2011, com dez satélites em órbita, começou a fornecer serviços para a região da Ásia-Pacífico desde o mesmo ano, com rigor na ordem dos metros, com dados de tempo e posicionamento entre as longitudes 55° E e 180° E e as latitudes 55° S e 55° N (China Satellite Navigation Office, 2013a) (He *et al.*, 2013);

- **BeiDou-3, Segunda Geração:** Esta geração, que iniciou este ano, com o lançamento do décimo sétimo satélite, levou ao início da fase de transição para a cobertura global. O sistema BeiDou, incluirá um novo sinal B1 civil, similar aos sinais L1C GPS e E1 Galileo, com a modulação em QPSK para MBOC, semelhante ao dos futuros sinais de outros sistemas referidos (Lu & Yao, 2014).

6.1.2. Satélites de Navegação BeiDou

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação BeiDou, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

6.2. Segmento de Controlo

O segmento de controlo BeiDou é constituído por três subsistemas, um *Master Control Station* (MCS), por uma rede de trinta *Monitor Station* (MS) e por uma rede de duas *Uplink Station* (ULS), responsável pelo funcionamento apropriado do sistema (He *et al.*, 2013).

O segmento de controlo está em expansão com a evolução do BeiDou para a capacidade de navegação global, prevista para depois do ano de 2020 (BeiDou Navigation Satellite System, *s.d.b*).

6.2.1. Master Control Station

Localizada na China, a MCS é o elemento central do sistema de controlo e monitorização do funcionamento da constelação de satélites do BeiDou, que processa as medições recebidas pelas MS, responsável por todos os aspetos de comando e controlo da constelação (He *et al.*, 2013).

6.2.2. Monitor Station

As MS estão distribuídas de forma uniforme na área da China e equipadas com relógios atómicos padrão e recetores BeiDou, adquirindo continuamente dados de todos os satélites visíveis (He *et al.*, 2013). Os dados obtidos são enviados para a MCS, onde são processados para estimar as órbitas e os erros de relógio dos satélites, para gerar a mensagem de navegação e outros parâmetros do sistema. Após estes procedimentos, os dados são transmitidos para os satélites, através das ULS, da mesma forma que estas permutam informação de controlo aos mesmos (Liu, 2013).

6.3. Segmento de Utilizador

Em 2011, o sistema terminou a colocação do seu segmento de controlo, incluindo a secção de teste do desenvolvimento do terminal de utilizador, que no entanto, apareceram em 2009 com base num *Application Specific Integrated Circuits* (ASIC), compreendendo um sistema GPS já integrado (Qianjun, 2013).

Deve notar-se, que na primeira versão do sistema, *BeiDou-1*, a posição do utilizador era calculada pelas MCS após receção dos sinais transmitidos com essa informação e, retransmitida de volta para os utilizadores, através dos satélites GEO, conceito que não foi adotado na evolução do sistema, que utiliza o modo usual de calcular a posição do utilizador no recetor (China Satellite Navigation Office, 2013b).

6.3.1. Serviços

O BeiDou, abrange tanto o serviço regional como global e, está a ser desenvolvido de forma gradual (China Satellite Navigation Office, 2012b). O sistema, que começou com o serviço regional (que cobre a China e as regiões próximas) e espera alcançar a FOC com serviços globais, foi projetado para incorporar dois serviços de posicionamento (Xinhua, 2015): o *Open Service* e o *Authorized Service*.

6.3.1.1. Open Service

Será um serviço gratuito e aberto a todos os utilizadores a nível mundial, capaz de calcular a solução de navegação, utilizando os mesmos princípios dos sistemas referidos e projetado para fornecer rigor da posição na ordem dos 10 m (China Satellite Navigation Office, 2013a);

6.3.1.2. Authorized Service

Será um serviço, com o objetivo de garantir uma elevado rigor e qualidade do posicionamento, em situações mais adversas e complexas, para a utilização do governo chinês, inclusive militar (BBC News, 2012).

6.3.1.3. Wide Area Differential Services

Será um serviço, com o objetivo de alcançar um nível de exatidão de posicionamento na ordem de 1 m, suportado pelo sistema regional, composto por trinta estações de transmissão de correções por parte dos satélites GEO, para além de mais de vinte estações

costeiras, que fazem correções ao posicionamento de navios no mar, perto destas, à semelhança do DGPS (China Satellite Navigation Office, 2013b) (Chen, 2011);

6.3.2. Configuração do Sinal

O BeiDou, atualmente na fase II, utiliza a técnica CDMA para enviar os diferentes sinais atuais na mesma frequência e o método de modelação QPSK para as bandas, B1 e B3 e BPSK para a banda B2, compostas por um sinal autorizado e outro aberto, à exceção da B3 que será apenas para serviço autorizado (Ávila Rodríguez, 2008).

Código PRN	B1-I	B1-Q	B2-I	B2-Q	B3
Frequência central	1561,098 MHz		1207.14 MHz		1268.52 MHz
Banda Frequência	B1		B2		B3
Técnica de acesso	CDMA				
Componente do sinal	Dados	Piloto	Dados	Piloto	Dados
Modulação	QPSK (2)		BPSK (2)	BPSK (10)	QPSK (10)
Frequência do código	2.046 MHz		2.046 MHz	10.23 MHz	10.23 MHz
Tipo Serviço	Open	Authorized	Open	Authorized	Authorized
Velocidade dos dados	50 bps	500 bps	50 bps	500 bps	50 bps

Tabela 6.1 – Características dos sinais da fase I do projeto BeiDou.¹⁷

A banda B1 BeiDou, é a mais importante para fins da navegação. Com a evolução para a fase III do projeto, existirão três sinais transmitidos pelo BeiDou nesta frequência, com a adição de sinal civil nesta banda, B1C, com modelação MBOC, e alteração da frequência e modulação do sinal (Ávila Rodríguez, 2008).

¹⁷ Adaptado de (Lu & Yao, 2014).

Serviço	B1C-I	B1C-Q	B1
Frequência central	1575,42 MHz		
Banda Frequência	B1		
Técnica de acesso	CDMA		
Componente do sinal	Dados	Piloto	Dados
Modulação	MBOC (6,1,1/11)		BOC (14,2)
Frequência do código	1.023 MHz		2.046 MHz
Tipo Serviço	Open		Authorized
Velocidade dos dados	50 bps	-	50 bps

Tabela 6.2 – Características do sinal B1 BeiDou.¹⁸

A banda B2 evoluirá, passando a dispor de quatro componentes, da B2a e da B2b, ambos com o canal de dados e o canal piloto, com modelação AltBOC (Ávila Rodríguez, 2008).

Serviço	B2a I	B2a Q	B2b I	B2b Q
Frequência central	1191,795 MHz			
Banda Frequência	B2			
Técnica de acesso	CDMA			
Componente do sinal	Dados	Piloto	Dados	Piloto
Modulação	AltBOC (15,10)			
Frequência do código	10.23 MHz			
Tipo Serviço	Open			
Velocidade dos dados	25 bps	-	50 bps	-

Tabela 6.3 – Características do sinal B2 BeiDou.¹⁹

Tal como a anterior, a banda B3, irá também ela evoluir, passando a dispor de mais duas componentes, da B2A e da B2I, com o canal de dados e o canal piloto, com modelação BOC (Ávila Rodríguez, 2008).

¹⁸ Adaptado de (Lu & Yao, 2014).

¹⁹ Adaptado de (Lu & Yao, 2014).

Serviço	B3	B3A I	B3A Q
Frequência central	1268,52 MHz		
Banda Frequência	B3		
Técnica de acesso	CDMA		
Componente do sinal	Dados	Dados	Piloto
Modulação	QPSK (10)	BOC (15,2,5)	
Frequência do código	10.23 MHz	2.5575 MHz	
Tipo Serviço	Authorized		
Velocidade dos dados	500 bps	50 bps	-

Tabela 6.4 – Características do sinal B3 BeiDou.²⁰

Embora nem todos os aspetos técnicos dos sinais BeiDou estejam ainda definidos, ambas as bandas de frequências serão semelhantes umas às outras e os novos sinais já foram apresentados à ITU.

6.3.3. Performance

O sistema BeiDou está a ser projetado para providenciar serviços de posicionamento e tempo, com níveis de rigor semelhantes aos do serviço do GPS e Galileo, com um rigor de posicionamento dentro dos 10 m, para os utilizadores em todo o globo terrestre (BeiDou Navigation Satellite System, *s.d.c*).

6.3.3.1. Performance dos Serviços BeiDou

O sistema *BeiDou-1*, depois do lançamento bem-sucedido do satélite *BeiDou-1C*, para a área da grande China, passou a providenciar serviços de navegação, com desempenho de rigor, com nível de confiança de 95%, seguinte (Chengqi, *s.d.*):

- **Posicionamento horizontal:** ~ 25 m;
- **Posicionamento vertical:** ~ 30 m;
- **Tempo:** ~ 50 ns.

O sistema *BeiDou-2*, que foi declarado oficialmente operacional no fim do ano de 2011, e que visa fornecer serviço de posicionamento e tempo global, teve os desempenhos

²⁰ Adaptado de (Lu & Yao, 2014).

iniciais de rigor, com 95% de confiança, seguintes (China Satellite Navigation Office, 2013a):

- **Posicionamento horizontal:** ~ 10 m;
- **Posicionamento vertical:** ~ 10 m;
- **Tempo:** ~ 20 ns.

Os desempenhos do sistema têm vindo a ser melhorados, com o aumento do número de satélites em órbita e a evolução do segmento de utilizador, com o objetivo de obter um posicionamento melhor que 10 m, para o *Open Service*, e 10 cm, para o *Authorized Service* (Chengqi, s.d.).

6.3.3.2. Performance dos Serviços Combinados

Utilizando o BeiDou combinado com o GPS, face ao aumento do número de satélites operacionais aumentar, torna-se relevante em termos de disponibilidade, acrescentar para valores acima de quinze satélites visíveis, de geometria, com a *Position Dilution of Precision* (PDOP) das constelações menor do que a de cada uma das constelações individuais conduzindo a uma maior precisão no posicionamento (Xu *et al.*, 2013).

6.4. Futuro e Evolução

Em 2011, o sistema BeiDou entrou em operação em fase experimental, fornecendo serviços iniciais de posicionamento e tempo, para toda a região da Ásia-Pacífico com uma constelação de 10 satélites (5 GEO e 5 IGSO) e um serviço operacional inicial que foi declarado oficialmente disponível (BBC News, 2012).

No ano seguinte, em 2012, foram realizados mais lançamentos, colocando em órbita dois satélites adicionais GEO e quatro MEO, com o objetivo de expandir a área de serviço para os utilizadores na Ásia-Pacífico e melhorar o desempenho do serviço.

A constelação é atualmente composta por 6 GEO, 5 IGSO e 4 MEO, que correspondem a 15 satélites operacionais dos 35 planeados.

A primeira versão do SIS do sinal BeiDou B1I em serviço aberto, foi anunciado em 2012, numa conferência realizada em Pequim pelo *Chinese State Council Information Office*, onde foi anunciado que o nome em inglês do sistema era agora substituído para *BeiDou Navigation Satellite System* (China Satellite Navigation Office, 2013b).

6.4.1. Arquitetura do Sistema

O sistema albergará um máximo de 35 satélites. Para que isto seja possível, o programa BeiDou tem sido estruturado de acordo com as três fases seguintes:

- **Fase 1:** Iniciada a partir de 2003, consiste num sistema de navegação regional experimental, *BeiDou-1*, que fornece serviço de navegação ativa para a região da China (Chengqi, s.d.) (China Satellite Navigation Office, 2012a);
- **Fase 2:** Iniciada em 2007, o *BeiDou-2* consiste numa constelação de satélites reduzida e oferecerá um serviço aberto para toda a área da China, com o objetivo de implementar um sistema com capacidade de posicionamento passivo e tempo numa determinada área regional (China Satellite Navigation Office, 2012a);
- **Fase 3:** Prevista para depois de 2020, o BeiDou chegará com a plena capacidade operacional, com a constelação de satélites composta pelos 35 satélites, existentes num sistema regional e expansão do segmento de controlo para áreas fora da região da China (China Satellite Navigation Office, 2012a). O BeiDou fornecerá serviços de navegação global, à semelhança dos sistemas de navegação globais GPS, GLONASS e Galileo (Chengqi, s.d.).

No futuro, o BeiDou deverá apoiar dois tipos de serviços gerais diferentes, o *Radio Determination Satellite Service* e o *Radio Navigation Satellite Service*. O primeiro, em que a posição do utilizador é calculada por uma estação terrestre, utilizando o tempo de ida e volta de sinais trocados via satélite, incluindo características como comunicação de mensagens de grande volume, ou ainda, a conexão à informação e a cobertura alargada (GPS World Staff, 2013a). O segundo, muito semelhante ao fornecido pelo GPS e Galileo, terá no seu projeto, alcançar desempenhos semelhantes aos destes sistemas (He *et al.*, 2013).

6.4.2. Interoperabilidade

O BeiDou incluiu a compatibilidade e a interoperabilidade com outros sistemas, tal como o segmento de utilizador e as respetivas aplicações, que se espera que sejam muito parecidas a todos os outros sistemas para o serviço livre (BeiDou Navigation Satellite System, s.d.a). O BeiDou tem uma particularidade perante os restantes sistemas, a

capacidade de permitir a troca de serviços de mensagens curtas entre as estações de controlo e os utilizadores.

O governo chinês considera a navegação por satélite, uma estratégia no desenvolvimento de tecnologia de informação e incentiva a cooperação internacional para garantir a compatibilidade e interoperabilidade com outros sistemas de navegação (China Satellite Navigation Office, 2012a).

Capítulo 7. *Regional Navigation Satellite System*

7.1. *Indian Regional Navigation Satellite System*

O *Indian Regional Navigational Satellite System* (IRNSS) é um sistema, desenvolvido pelo Governo Indiano, mais propriamente, pela *Indian Space Research Organization* (ISRO) no âmbito do programa nacional de desenvolvimento espacial, que se destina a fornecer informação de posicionamento sobre o território da Índia, serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo, numa base contínua regional, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (Indian Research Space Organization, *s.d.b*).

Este sistema de navegação regional autónomo e independente operará numa área de cerca de 1500 km em torno da Índia, sob controlo total e construção própria dos vários segmentos do sistema (Indian Space Research Organization, 2014).

O principal objetivo do projeto da constelação será de melhorar a geometria dos satélites minimizando o valor do DOP e o número de satélites visíveis (Neelakantan, 2010).

7.1.1. Segmento Espacial

A constelação nominal base IRNSS é constituída por 3 satélites operacionais GEO, localizados nas longitudes 32,5° E, 83° E e 131,5° E, e 4 satélites IGSO, com uma inclinação de 29° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 55°E e 111.5°E (Indian Space Research Organization, 2014).

Os satélites IRNSS operarão em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade inferior a 0.002° e um semieixo maior de 47153 km, correspondente a uma altitude de 35786 km, referente a uma MEO e, possuirão um período orbital de 23 h 56 m (24 h siderais) (Indian Space Research Organization, 2014).

O primeiro destes satélites a ser lançado foi o *IRNSS-1A*, a 1 de julho de 2013, com um tempo de vida útil de aproximadamente 9 anos e meio (Inside GNSS, 2013b). De momento, o sistema conta com quatro satélites, o último, *IRNSS-1D*, foi enviado para a órbita no primeiro semestre deste ano (Inside GNSS, 2015a).

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação IRNSS, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

7.1.2. Segmento de Controlo

Constituído por dois grandes sistemas, a *IRNSS Space Craft Control Centre* (SCC) e o *IRNSS Navigation Centre* (INC), para além de *IRNSS TTC & Uplinking Stations* (IRTTC), *IRNSS Range and Integrity Monitoring Stations* (IRIMS), *IRNSS Timing Centre* (IRNWT), *IRNSS CDMA Ranging* (IRCDR), *IRNSS Laser Ranging Station* (ILRS) e, *IRNSS Data Communication Network* (IRDCN), o segmento de controlo é responsável pelo funcionamento apropriado do sistema IRNSS (Indian Research Space Organization, s.d.c).

O SCC e o INC, formam o núcleo deste segmento e são os responsáveis por estimar e prever as órbitas, calcular a integridade, as correções ionosféricas e os erros do relógio dos satélites e executar o *software* de navegação (Indian Space Research Organization, 2014).

7.1.1. Segmento de Utilizador

A nível do utilizador, o recetor IRNSS será capaz de receber e processar dados de navegação de outras constelações GNSS, sendo os seus satélites continuamente acompanhados pelo recetor de utilizador, que operará em dupla frequência ou frequência única, nas bandas de frequências L5 e S, com a capacidade de receber as correções ionosféricas. (Indian Space Research Organization, 2014).

Quanto aos serviços que virão a disponibilizar, o *Standard Positioning Service* (SPS) e o *Restricted Service* (RS) estão planeados, para retirarem vantagem do reduzido número de satélites que possui, de modo a transmitir correções ionosféricas e garantir desempenhos com rigor da posição de cerca de 20 m sobre a região do oceano Índico e melhor do que 10 m de sobre os países adjacentes à Índia e dados do almanaque, efemérides e tempo, com a mesma precisão que os GNSS existentes (Indian Space Research Organization, 2014).

Código PRN	L5-SPS	L5-RS	S-SPS	S-RS
Frequência central	1176,45 MHz		2492,028 MHz	
Banda Frequência	L5		S	
Técnica de acesso	CDMA		CDMA	
Componente do sinal	Data	Data	Data	Data
Modulação	BPSK (1)	BOC (5,2)	BPSK (1)	BOC (5,2)
Frequência do código	1.023 MHz	2.046 Mhz	1.023 MHz	2.046 Mhz
Tipo Serviço	SPS	RS	SPS	RS
Velocidade dos dados	25 bps	25 bps	25 bps	25 bps

Tabela 7.1 – Características dos sinais IRNSS.²¹

7.1.1. Futuro e Evolução

Após aprovado o projeto pelo governo indiano em 2006, com a intenção de o ter concluído e operacional em 2015, o primeiro satélite da constelação foi lançado com sucesso em 2013 e foram iniciados então testes de verificação e transmissão (Inside GNSS, 2013c). O governo indiano espera assim, ter a órbita de sete satélites completa no próximo ano, face aos vários sucessos conseguidos nos lançamentos, com dois satélites de cada tipo já em órbita (Inside GNSS, 2015b).

Com a receção de um sinal transmitido na banda L5 do satélite *IRNSS-1A*, e após análise das pesquisas deste pelo *German Aerospace Center*, concluíram que a estrutura do sinal era coerente com a anunciada no plano de sinal IRNSS pela ISRO (Indian Space Research Organization, 2014).

Em 2014, com o objetivo de iniciar a constelação de satélites GEO, foi lançado com sucesso o *IRNSS-1B* e ainda no mesmo ano, o terceiro satélite, *IRNSS-1C*, cujo controlo do mesmo, foi assumido pelo centro de controlo da ISRO, a fim de posicionar o satélite também ele num GEO, na longitude 83° E (Gunter Space, *s.d.c*). Tal como fizera com os anteriores, face ao quarto satélite em órbita, o *ISRO's Master Control Facility*, assumiu o controlo do satélite e realizou várias manobras, a fim de posicioná-lo na órbita GSO na longitude 111,75° E, com 30,5° de inclinação (Inside GNSS, 2015b).

²¹ Adaptado de (United Nations, 2010).

7.2. Quasi-Zenith Satellite System

O *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) é um sistema de navegação por satélite, desenvolvido pelo Governo Japonês no âmbito do programa nacional de desenvolvimento espacial, que serve essencialmente para melhorar a qualidade do sinal dos GNSS, para fornecer serviços fiáveis de posicionamento, navegação e medição do tempo, numa base contínua regional, por intermédio da transmissão de sinais na banda L, para um recetor (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

O programa deste sistema regional iniciou-se em 2002 pela *Advanced Space Business Corporation* (ASBC), mas que face ao seu colapso, passou para a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e para a *Satellite Positioning Research and Application Center* (SPAC). Em 2007, o programa de desenvolvimento e pesquisa do QZSS foi aprovado (Japan Aerospace Exploration Agency & QZSS Project Team, 2009).

7.2.1. Segmento Espacial

O serviço do QZSS é um sistema complementar que utilizará toda a constelação GNSS, de forma a providor posicionamento para a área do leste asiático e região da Oceânia (QZSS Project Team Office of Space Applications JAXA, 2006).

A constelação nominal base QZSS é constituída por 3 satélites operacionais, distribuídos em 3 planos orbitais, com uma inclinação de 43° em relação ao equador e com a longitude do nó ascendente separada por 195° de plano para plano (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

Os satélites QZSS operarão em órbitas aproximadamente circulares, com uma excentricidade inferior a 0.075° e um semieixo maior de 42164 km, correspondente a uma altitude de 32000 km, referente a uma HEO. Os satélites possuirão um período orbital de 23 h 56 m (24 h siderais), o que significa que todos eles passam sobre a mesma posição na terra, e pelo menos um deles fica perto do zénite sobre o Japão, daí a origem do nome *quasi-zenith*. Este facto permite que cada satélite seja visível, na maior parte das vezes, mais de 12 horas por dia durante o seu trajeto (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

O primeiro destes satélites a ser lançado, foi o *Michibiki*, a 11 de setembro de 2010 e inserido na órbita *Quasi-Zenith* nesse mesmo ano, com um tempo de vida útil de aproximadamente 10 anos (Japan Aerospace Exploration Agency, 2010).

No anexo A, consta uma lista com todos os satélites de navegação QZSS, que já foram lançados, assim como, informação do lançamento e o estado atual da constelação.

7.2.2. Segmento de Controlo

Constituído por cinco grandes subsistemas, a *Master Control Station* (MCS), uma rede de *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C), *Uplink Station* (ULS), e uma rede de nove *Monitor Station* (MS) e *Time Management Station* (TMS), o segmento de controlo, é responsável pelo funcionamento apropriado do sistema QZSS (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

As MS que se encontram distribuídas no território japonês, analisam os sinais QZSS e GNSS, passando os seus produtos da monitorização para a MCS, que estima e prevê as órbitas e os erros do relógio dos satélites, gerando as mensagens de navegação. As *Tracking Control Stations*, onde estão as TT&C e as ULS, transmitem essas mensagens de navegação e monitorizam o estado dos satélites, sendo o TMS responsável por comunicar o tempo deste sistema.

7.2.1. Segmento de Utilizador

A nível do utilizador do sistema QZSS, a compatibilidade com os outros sistemas de posicionamento é um requisito obrigatório, dado que este trabalha nas mesmas bandas de frequências, sem interferências prejudiciais, conseguindo um maior rigor (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

Desta forma, o sistema japonês, dispõe de seis sinais diferentes, para melhorarem a disponibilidade de posicionamento, navegação e tempo. O L1-C/A, L1C, L2C e L5, de modo a serem utilizados em combinação com qualquer GNSS, e ainda o L1-SAIF, para aumento da exatidão ao nível submétrico, interoperável com os SBAS GPS. Por último o LEX, um sinal experimental, compatível com o sinal Galileo E6, para serviço de alta precisão (QZSS Project Team Office of Space Applications JAXA , *s.d.*). A combinação dos sistemas GPS+QZSS comparativamente ao sistema GPS autónomo irá providenciar uma melhoria do posicionamento, através de dados de correção previstos, com recurso a

sinais L1-SAIF e LEX (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014). Para além disso, irá também melhorar a monitorização de integridade do GNSS, com o controlo de falhas e notificação sobre o estado do sistema.

Código PRN	L1- SAIF	L1-C/A	L1C-I	L1C-Q	L2CM	L2CL	L5-I	L5-Q	LEX
Frequência central	1575,42 MHz				1227,6 MHz		1176,45 MHz		1287,75 MHz
Banda Frequência	L1				L2		L5		
Técnica de acesso	CDMA				CDMA		CDMA		CDMA
Componente do sinal	Dados	Dados	Dados	Piloto	Dados	Piloto	Dados	Piloto	Dados
Modulação	BPSK (1)		BOC (1,1)		BPSK (1)		BPSK (10)		BPSK (5)
Frequência do código	1.023 MHz				1.023 MHz		10.23 MHz		5.115 MHz
Tipo Serviço	Autorizado	Civil			Civil		Civil		Autorizado
Velocidade dos dados	250 bps	50 bps	25 bps	-	25 bps		50 bps	-	2000 bps

Tabela 7.2 – Características dos sinais QZSS.²²

7.2.1. Futuro e Evolução

Com a fase de operação inicial terminada em 2011, iniciou-se a fase das verificações técnicas e demonstrações de aplicações recorrendo ao satélite *Michibiki*. Os resultados obtidos, mostraram que um utilizador do sistema GPS+QZSS, ao viajar dentro de Tokyo, melhora a sua posição na pior situação de DOP GPS (Japan Aerospace Exploration Agency & QZSS Project Team, 2009). Por este facto, o governo japonês decidiu acelerar a implementação do sistema, a fim de obter a constelação de satélites até ao final da década, com o objetivo final de alcançar um total de 7 satélites.

Porém este plano foi alterado, face a um contrato que o *Japanese Cabinet Office* formalizou com a *Mitsubishi* em 2013, para a construção de um satélite geoestacionário e dois satélites adicionais QZSS, que estão planeados para serem lançados antes do final de 2017 (Inside GNSS, 2013a). Foi assinado outro contrato, com uma sociedade liderada pela empresa NEC e apoiada pela *Mitsubishi UFJ Lease & Finance* e a *Mitsubishi Electric Corporation*, para financiar o projeto e a construção do segmento de controlo, bem como a sua verificação e manutenção por 15 anos (Inside GNSS, 2013a).

²² Adaptado de (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014).

Capítulo 8. *Satellite Based Augmentation System*

Um *Satellite Based Augmentation System* (SBAS) é um sistema que tem a capacidade de complementar e melhorar a qualidade do serviço GNSS em modo autónomo, em termos de precisão, integridade, continuidade e disponibilidade (European GNSS Agency, *s.d.d*).

Os SBAS são constituídos por estações de referência amplamente dispersas em terra, que monitorizam e recolhem dados GNSS, com o objetivo de determinar as correções aos erros de observação e dos satélites e também o seu estado de funcionamento, as quais são processadas e parametrizadas, para depois serem enviadas por estações para os satélites dos sistemas. Os satélites SBAS, localizados em órbita, de forma a cobrirem determinadas regiões, retransmitem as correções dos sistemas para os recetores GNSS, utilizando uma frequência semelhante à utilizada por estes sistemas (European Geostationary Navigation Overlay Service, 2009).

8.1. *European Geostationary Navigation Overlay Service*

O sistema *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) é um serviço SBAS que complementa os serviços de navegação por satélite existentes, e que, juntamente com o Galileo, constituem os dois principais projetos da Europa em termos de navegação por satélite (European Commission, 2015) (European GNSS Agency, *s.d.a*).

8.1.1. Segmento Espacial

O segmento espacial EGNOS é composto atualmente por três tipos de satélites GEO, centrados sobre a Europa e projetados para 10 anos de vida útil. Os dois últimos satélites referidos de seguida, irão substituir os dois primeiros, porém é importante também referi-los (European Geostationary Navigation Overlay Service, 2009):

- ***Inmarsat 3-F2 AOR-E (Região Leste do Oceano Atlântico)***: Satélite lançado em 1996;
- ***Inmarsat 4-F2 IOR-W (Região Oeste do Oceano Índico)***: Satélite lançado em 2012;
- ***ESA-Artemis (sobre a África)***: Satélite lançado em 2001, que expande e melhora todas as áreas de navegação, comunicações móveis e entre satélites;
- ***Astra 4B***: Lançado em 2012;

- **Astra 5B:** Lançado em 2014.

Os principais critérios seguidos na seleção da posição destes satélites foram a melhoria da geometria e disponibilidade do sistema Galileo, maximização da visibilidade, minimizando o risco de bloqueio do sinal, e por último, o fornecimento de cobertura geoestacionária dentro da área do serviço principal (Ventura-Traveset & Flament, 2006).

8.1.2. Segmento de Controlo

O EGNOS é controlado através da *Central Control Facility* (CCF), responsável pela monitorização permanente e controlo de todo o sistema, com a função de supervisionar os subsistemas de controlo, monitorizar o sistema de missão, os satélites e estimar o nível de desempenho do serviço (Toran-Marti & Ventura-Traveset, 2004).

O sistema dispõe de uma rede de *Ranging Integrity Monitoring Stations* (RIMS), que recebe os dados dos satélites GPS e transmite-as, para a *Central Processing Facility* (CPF) que as utiliza, para elaborar as correções do relógio dos satélites, calcular órbitas precisas, e elaborar um modelo do atraso ionosférico (Toran-Marti & Ventura-Traveset, 2004). As mensagens elaboradas pela CPF são depois transmitidas para as *Navigation Land Earth Stations* (NLES), que as enviam para os satélites EGNOS (Ventura-Traveset & Flament, 2006).

O sistema dispõe ainda de uma *EGNOS Wide Area Network* (EWAN), que fornece comunicações para todos os componentes deste segmento, para além de apoiar as operações de sistemas e a prestação de serviços (Ventura-Traveset & Flament, 2006).

8.1.3. Segmento de Utilizador

Este SBAS é interoperável com outros existentes, com benefícios e vantagens, que levam organizações como a *European Global Navigation Satellite System Agency* (GSA) e outras envolvidas na indústria do GNSS, a trabalhar na definição de protocolos de comunicação e de performances de utilizador para recetores compatíveis (European Space Agency, 2010b). Entre as inúmeras aplicações, o SISNeT permite a transmissão das correções EGNOS através da InterNet, estando a informação de navegação de alta precisão disponível, através desse meio, em tempo real (European Space Agency, 2010b). Tal como qualquer outro SBAS, transmite essa informação na banda L1, face aos

rigorosos padrões estabelecidos pela ICAO ou a *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA) (Ventura-Traveset & Flament, 2006).

O EGNOS suporta uma ampla variedade de aplicações. Para facilitar a prestação de serviços juntamente com o Galileo, os requisitos são expressos em termos dos diferentes serviços que este suporta, designados por OS, para o público geral, SoL, que fornece maior desempenho em salvaguarda da vida humana e o *EGNOS Data Access Service* (EDAS), com maiores desempenhos a nível comercial e profissional (European GNSS Agency, 2014a, 2014b, 2014c).

8.1.4. Futuro e Evolução

Os principais desenvolvimentos do EGNOS, visam acompanhar o ritmo de desenvolvimento dos sistemas globais de posicionamento por satélite e estão a ser estudados com o objetivo de estarem operacionais até 2020, seguindo os padrões estabelecidos pelo EGEP, e assegurando a coordenação da evolução com a dos outros SBAS (Ventura-Traveset, Basker, & Ashton, 2000). Prevê-se ainda que venha a melhorar a relação sinal-ruído em futuras reposições do segmento espacial EGNOS, com a intenção de melhorar o desempenho a nível do utilizador, transmitindo na banda L1 e L5 e, capaz de transmitir sinais de dupla frequência compatíveis com especificações de sinal GPS e Galileo (Ventura-Traveset *et al.*, 2000).

8.2. Wide Area Augmentation System

O SBAS desenvolvido pelos EUA, o *Wide Area Augmentation System* (WAAS), inclui uma área de serviço que abrange o continente dos EUA, Alaska, Canadá e México, começou a ser desenvolvido em 1992 pela *Federal Aviation Agency* (FAA), essencialmente para dar resposta às necessidades da aviação civil, tendo sido declarado operacional no final do ano de 2003 (Federal Aviation Administration, 2008). Três das quatro fases de desenvolvimento já foram atingidas, estando a quarta em progresso, juntamente com planos de melhoria da capacidade do sistema, dada a evolução dos padrões SBAS em termos de serviços em dupla frequência (Federal Aviation Administration, 2014a).

8.2.1. Segmento Espacial

No âmbito do segmento espacial, este é composto atualmente por diversos satélites de comunicação GSO, responsáveis pela transmissão da mensagem de aumento, através dos serviços de área WASS. O sistema é composto atualmente por três tipos de satélites (Federal Aviation Administration, 2008):

- ***Inmarsat 4-F3***: Satélite lançado em 2008;
- ***Telesat Anik F1R***: Satélite lançado em 2005;
- ***Intelsat Galaxy 15***: Satélite lançado em 2005 e reposicionado em órbita em 2011, após manutenção devido a falhas técnicas.

8.2.2. Segmento de Controlo

Este sistema funciona através do processamento de dados GPS, reunidos por uma rede de *Wide-area Reference Stations* (WRS), para gerar as mensagens SBAS nas *WAAS Master Station* (WMS), as quais reúnem os dados encaminhados pela WRS. AS WRS enviam esses dados para os satélites GEO, com recurso às *Ground Uplink Stations* (GUS), para que os dados de navegação sejam retransmitidos pelos satélites para os utilizadores e permitam calcular a posição (Federal Aviation Administration, 2014a).

Existem ainda OCC utilizados para monitorizar a performance do sistema, realizar as correções necessárias e ainda realizar operações de manutenção periódicas (Federal Aviation Administration, 2008).

8.2.3. Segmento de Utilizador

Embora o principal objetivo do WAAS seja a comunidade de utilizadores da aviação civil, ao proporcionar maior integridade e rigor dos serviços SPS GPS, transmitindo informação de aumento que corrige as efemérides GPS, muitos dos recetores podem ser configurados para receber e processar o SIS WAAS e assim, beneficiar do rigor oferecido e aumentar os requisitos de performance (Department of Transportation United States of America, 2001). O SIS WAAS foi assim projetado, para minimizar as modificações padrão do *hardware* dos recetores GPS, compreendendo a modelação das frequências da portadora, a estrutura das mensagens e o seu conteúdo. Desta forma, o WAAS transmite sinais, tal como o GPS na frequência L1, modulados com o código C/A (Federal Aviation Administration, 2015a).

Os desempenhos do SBAS, são usualmente descritos em termos de integridade, precisão, disponibilidade e continuidade, que de acordo com as performances padrão do WAAS, são divididos em cinco zonas. Zona do continente americano (1), do Alaska (2), do Hawaii (3), de Porto Rico e Caraíbas (4), e outras zonas do território dos EUA (5), com uma cobertura acima dos 100000 pés acima da superfície (Eldredge, 2011) (Federal Aviation Administration, 2008).

8.2.4. Futuro e Evolução

Em termos futuros, ainda por complementar nas duas últimas fases do projeto do sistema, está a melhoria da tecnologia do sistema e atualizações do segmento espacial, iniciando então a transmissão do sinal L5 GPS, com especificações, planeamento, definição de interfaces e normas, desenvolvimento de recetor, entre outras, referentes à fase III de melhoria da performance do sistema (Clore, 2011). Já a última fase, fase IV, das operações em dupla frequência, planeada para o período 2014-2028, o WAAS deverá começar a operar em dupla frequência. Isto implicará a transição para o serviço de dupla frequência SBAS L1 / L5, até 2028, para além de manter uma robusta, fiável e sustentável capacidade do sistema, garantindo uma alta performance na disponibilidade, com operações constantes na manutenção (Federal Aviation Administration, 2015a).

8.3. *MTSAT Satellite Augmentation System*

O SBAS japonês, *MTSAT Satellite Augmentation System* (MSAS), o qual utiliza satélites *Multifunctional Transport Satellites* (MTSAT) de propriedade e operação do *Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport* e do *Japan Meteorological Agency* (JMA), tem como principal objetivo, melhorar a precisão, a integridade e a disponibilidade do GPS, fornecendo cobertura na área do Japão e da Austrália, os principais utilizadores das imagens destes satélites (Japan Civil Aviation Bureau, 2007).

Este sistema foi declarado operacional em 2007, face ao sucesso dos primeiros testes realizados ao nível da aviação (Japan Civil Aviation Bureau, 2007).

8.3.1. Segmento Espacial

O segmento espacial é composto por dois satélites de comunicações GSO, os MTSAT, que fornecem dados de navegação com a correção às mensagens geradas pelas estações de controlo principal, para receção dos utilizadores, e ainda estão dedicados para fins

meteorológicos, fornecendo imagens em cinco bandas de comprimento de onda. O sistema é constituído no momento, pelos seguintes satélites(Japan Meteorological Agency , 2015):

- **Himawari 7:** Lançado em 2006, com um período de operação até este ano;
- **Himawari 8:** Lançado em 2014, com um período de operação previsto até 2022;
- **Himawari 9:** Previsto ser lançado em 2016, para operação até 2029.

8.3.2. Segmento de Controlo

O MSAS funciona através do processamento de dados GPS, recolhidos pela rede de estações de referência, para gerar a mensagem SBAS, que é depois enviada para os satélites GEO, os quais transmitem esta informação para os recetores de utilizador, calculando a posição (Japan Civil Aviation Bureau, 2008).

O segmento de controlo é composto por quatro *Ground Monitor Station*, que reúnem informação dos sinais de GPS e de MTSAT e enviam-nos para duas *Master Control Station* (MCS), que calculam as correções de precisão diferencial e o limite de integridade, enviando posteriormente para os satélites para retransmissão para o segmento de utilizador (Japan Civil Aviation Bureau, 2008).

Este segmento é ainda complementado, por duas *Monitor and Ranging Station* (MRS), que funcionam também elas como *Ground Monitor Station*, e cuja finalidade é a determinação da correção orbital dos satélites MTSAT (Japan Civil Aviation Bureau, 2008).

8.3.3. Segmento de Utilizador

Os recetores deste sistema recebem correções MSAS dos satélites MTSAT, à informação transmitida de cada satélite GPS, para determinação da sua localização e tempo atual, sendo o projeto dos recetores MSAS, idêntico ao dos concebidos para o WAAS, com performances geralmente descritas em termos de precisão, integridade, disponibilidade e continuidade (Japan Civil Aviation Bureau, 2007).

8.3.4. Futuro e Evolução

Num futuro próximo, as melhorias dos sinais MSAS, passarão pela expansão do comprimento de banda para L1 e L5, para permitir operações de dupla frequência, obtenção de compatibilidade e interoperabilidade entre as diferentes constelações SBAS

e GNSS e ainda garantir o apoio de capacidade, com GMS adicionais (Japan Civil Aviation Bureau, 2008).

8.4. System for Differential Corrections and Monitoring

O *System for Differential Corrections and Monitoring* (SDCM) é o SBAS atualmente em desenvolvimento pela Federação Russa, como uma parte integrante do sistema global GLONASS (Gibbons, 2009). Ao contrário dos restantes sistemas, a principal diferença é este ser concebido, de forma a realizar monitorização da integridade dos satélites GLONASS, para além dos do GPS (Oleynik, 2012).

Com a arquitetura que dispõe, permite uma cobertura de área que abrange toda a Rússia e cujos principais objetivos são fornecer correções diferenciais para os satélites GLONASS e analisar detalhes das performances do sistema (Stupak, 2013).

8.4.1. Segmento Espacial

Composto por 3+1 satélites GEO, utilizam atualmente o transponder *Luch Multifunctional Space Relay System*, de modo a permitir a transmissão de dados de correção e integridade do sistema. Com um tempo de vida útil pensado para 10 anos de utilização, os satélites existentes atualmente são (Russian Space News, 2014) (Oleynik, 2012):

- **Luch-5A:** Colocado em órbita em 2011;
- **Luch-5B:** Colocado em órbita em 2012;
- **Luch-5V:** Colocado em órbita em 2014;

Para além destas transmissões, prevê-se ainda que o sistema forneça informação aos utilizadores via InterNet e *Global System for Mobile Communications* (GSM), através de servidores SISNet e servidores *Networked Transport of RTCM via InterNet Protocol* (NTRIP) (Lyskov & Head, 2013).

8.4.2. Segmento de Controlo

O segmento de controlo SDCM é composto por uma rede de dezanove estações de referência, dentro da área que detém o controlo, mais quatro fora desta, instalações de processamento centrais, complementadas por uma estação de reserva, de estações de transmissão e meios terrestres para esse fim (Stupak, 2013).

8.4.3. Segmento de Utilizador

Em termos de receção do sinal pelos utilizadores, o rigor de posicionamento fornecido pelo SDCM será de 1 a 1,5 m no plano horizontal e de 2 a 3 m no vertical e espera-se que este venha a oferecer um rigor ao nível dos centímetros para os utilizadores numa área de 200 km contados a partir das estações de referência, com sinais nas bandas L1, L3 e L5 (Federal Space Agency, 2013).

8.4.4. Futuro e Evolução

A nível futuro, apenas se sabe que a atual família de satélites *Luch* deverá ser substituída pela *Enise*, no âmbito da evolução do sistema SDCM (Federal Space Agency, 2013).

8.5. *GPS Aided Geosynchronous Augmented Navigation System*

O *GPS Aided Geo Augmented Navigation System* (GAGAN) é o sistema SBAS que foi implementado pelo Governo Indiano, a partir de 2001, após acordo do *Airports Authority of India* com a ISRO, com um plano de desenvolvimento constituído em duas diferentes fases, a *Technology Demonstration System* (TDS), completa em 2007 e a *Final Operational Phase* (FOP), de forma a melhorar o sinal GPS (Sayeenathan, 2013).

8.5.1. Segmento Espacial

O segmento espacial é composto por três satélites GEO operacionais (Indian Research Space Organization, *s.d.c*):

- **GSAT-8:** Lançado com sucesso em 2011;
- **GSAT-10:** Lançado com sucesso em 2012;
- **GSAT-15:** Planeado ser lançado até ao fim do ano.

8.5.2. Segmento de Controlo

Ao nível do comando e controlo, os dados GPS são recebidos e processados em quinze *Indian Reference Stations* (INRES) para calcular as correções diferenciais e estimar o nível de integridade nos *Indian Master Control Center* (INMCC) (Sayeenathan, 2013).

A mensagem SBAS, após ser gerada pelos dois INMCC, é enviada para os satélites GEO, através das *Indian Land Uplink Station* (INLUS) (Sunda, 2012).

8.5.3. Segmento de Utilizador

Quanto aos recetores GAGAN, que detêm a mesma tecnologia dos recetores americanos WAAS, abrangidos para os sinais GPS, são capazes de utilizar o SIS GAGAN, e com isto, a disponibilidade deste sinal veio preencher a lacuna existente, entre as áreas de cobertura dos SBAS EGNOS e MSAS (Inside GNSS, 2014a). Estes recetores recebem informação dos satélites que transmitem dados de navegação SBAS, utilizando os sinais L1 e L5, com modelação semelhante ao GPS (Sayeenathan, 2013).

No fim do ano de 2013, o sistema GAGAN foi certificado para o nível de serviço RNP (*Required Navigation Performance*) 0.1 pelo *Director General of Civil Aviation* (DGCA), face à capacidade de usar o SIS GAGAN no espaço aéreo indiano para rotas de navegação e aproximação não-precisas, sem orientação vertical (GPS World Staff, 2014a).

8.5.4. Futuro e Evolução

Uma das principais preocupações da implementação deste SBAS é o comportamento da ionosfera a estas latitudes, dado a Índia estar localizada no cinturão de anomalia ionosférica equatorial, produzindo gradientes espaciais e temporais, fornecendo orientação vertical junto a esta aos utilizadores de frequência única. Portanto, o equipamento de utilizador e as estações de referência do sistema SBAS podem sofrer problemas de acompanhamento e de ruído, daí ser uma constante preocupação para conseguir colmatar este facto a nível futuro do sistema (Wu *et al.*, 2006).

8.6. *Satellite Navigation Aided System*

De forma a ter também o seu próprio SBAS, a República Popular da China encontra-se a desenvolver o *Satellite Navigation Augmentation System* (SNAS).

8.6.1. Segmento Espacial

O projeto para este sistema não conta ainda com qualquer satélite em vias de ser lançado, dado estar em desenvolvimento o seu sistema de navegação global, o BeiDou, do qual já consegue tirar partido para operação a nível regional (China Satellite Navigation Office, 2012a).

8.6.2. Segmento de Controlo

Às onze estações instaladas em torno da região de Pequim, na fase I do programa, juntar-se-ão mais doze, já construídas pela empresa *Novatel* e em funcionamento desde 2002, de forma a fazer face à fase II de desenvolvimento do sistema (GPS World Staff, 2002).

8.6.3. Segmento de Utilizador

Durante a apresentação do estado de desenvolvimento do BeiDou, o *China Satellite Navigation Office* indexou os serviços que o sistema BeiDou proporciona, sendo um deles *Wide Area Differential Services*, que presumivelmente corresponde ao sistema SBAS, que visa um rigor de posicionamento de aproximadamente 1 m (China Satellite Navigation Office, 2011).

Capítulo 9. Processamento de Dados GNSS

9.1. Dados GNSS

Esta parte do trabalho da dissertação, como uma componente experimental, foi realizada com recurso a dados a observações GNSS de dados não processados. Os dados cinemáticos no formato *Receiver INdependent EXchange* (RINEX) foram obtidos durante uma missão do NRP “Auriga”. Os dados estáticos foram obtidos na InterNet, na página do Instituto Geográfico Português (IGEO), para uma das estações de referência deste.

O RINEX é um formato padrão para gravação de dados brutos GNSS, independente do fabricante do recetor e aceite por toda a comunidade de utilizadores e por todos os *softwares* de processamento. Este formato foi projetado para evoluir ao mesmo tempo que novos sistemas de navegação vão sendo criados e novas medidas fornecidas (Gurtner & Mader, 2011).

Como referido anteriormente, o produto final de um recetor de sinal de um sistema de navegação é normalmente a sua posição e velocidade, com base numa série de medições de uma ou mais constelação de satélites. Apesar dos recetores calcularem as posições em tempo real, em muitos casos, torna-se relevante armazenar as medidas intermédias realizadas para esse cálculo, para posterior utilização, permitindo assim manipular as medidas geradas por este, bem como o seu processamento *off-line* para uma diversidade de aplicações, independentemente do tipo de recetor e de aplicação computacional que lê estes ficheiros (Gurtner & Estey, 2013).

A versão mais recente do RINEX é a 3.2, que inclui e aceita ficheiros das versões anteriores. É composta por três tipos de ficheiros ASCII, o ficheiro de dados de observação, o ficheiro da mensagem de navegação e o ficheiro de dados meteorológicos, cujo formato foi otimizado, para possuir requisitos mínimos de espaço, independentes do número de diferentes tipos de observação de um recetor de satélite ou sistema específico (Gurtner & Mader, 2011). No caso específico desta dissertação, não foram utilizados dados meteorológicos. Foram utilizados ficheiros da mensagem de navegação, com informação das efemérides, e ficheiros de dados de observação.

9.2. GPSTk

O *GPS Toolkit* (GPSTk) fornece um amplo conjunto de rotinas em linguagem de programação C++ já testadas e que podem ser incorporadas diretamente em qualquer projeto pessoal. O GPSTk tem por objetivo providenciar, a toda a comunidade de utilizadores e investigadores do GNSS, um conjunto de rotinas e de aplicações que podem ser usadas, continuamente desenvolvidas, e orientadas para o processamento de dados GNSS e de outros sensores. Este projeto está concebido para ser, tanto quanto possível, uma plataforma independente e aberta a toda comunidade, sob a responsabilidade e coordenação do *Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin*, mas que beneficia da contribuição de muitos investigadores a nível mundial (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013b).

Em todo o código de programação desenvolvido no GPSTk, são utilizados os princípios da programação orientada por objetos na linguagem C++, por ser modulável, extensível e de fácil manutenção (Harris & Mach, 2007). Assim, é composto por uma biblioteca principal, bibliotecas auxiliares, e um conjunto de aplicações, que são a base para desenvolver outras mais avançadas ou adaptadas a necessidades específicas, fornecendo uma larga variedade de opções que resolvem problemas de processamento associados ao GNSS, incluindo o processamento ou utilização de formatos padrão como o RINEX (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013b).

A principal vantagem do GPSTk é a sua biblioteca de *software*, que fornece a mais robusta, útil e independente plataforma do código no GPSTk, através de uma série de modelos e algoritmos robustos que afetam e estão ligados aos GNSS e estão em constante atualização, como por exemplo o cálculo da posição e de efemérides, estimar a refração ionosférica, ou ainda, a representação e conversão do tempo, permitindo fornecer funcionalidades básicas para a criação de projetos independentes relacionados com os sistema de navegação por satélite e de outros sensores de navegação (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013b).

9.3. Tratamento de dados

Desenvolvido no âmbito da criação de um programa de pós-processamento de dados GNSS para a Escola Naval, esta fase inicial, contou com a utilização de rotinas já existentes, e a partir destas, transformá-las, modifica-las e adaptá-las, de forma a criar um

programa que venha a permitir o processamento de dados brutos GNSS, no formato RINEX, para o cálculo da posição de um objeto em movimento, com recurso a observações de pseudo-distância em modo absoluto (sem estações de referência).

Deste modo, foi utilizado o modelo ionosférico de Klobuchar, com base nos parâmetros que estão incluídos na mensagem de navegação, e troposféricos do RTCA, em função da latitude, altitude e dia do ano, para medir e remover os erros associados a cada uma destas camadas da atmosfera, que afetam o sinal (Klobuchar, 1996)(Radio Technical Commission for Aeronautics, 2006). Para além disso, foi aplicado um filtro, que filtrou os satélites com observações fora dos limites e, foi calculada a solução pelo método dos mínimos quadrados. Por último, foi feito o processamento de todos os dados com recurso ao acima referido.

A listagem do programa realizado encontra-se no anexo C, assim como o ficheiro de configuração, que auxiliou na definição dos parâmetros de entrada e o código para leitura em gráficos 2D e 3D.

9.4. Resultados Obtidos

9.4.1. Estação Estática

Foi realizado o processamento de dados da estação estática, TPS NETG3, do Instituto Geográfico Português, localizada na posição de coordenadas WGS-84 em metros:

- $X = 4919032.1862$;
- $Y = -793055.3627$;
- $Z = 3968746.4404$.

Os dados referentes a 5 de janeiro deste ano, com um intervalo de 5 segundos, permitiu analisá-los e corrigir as posições durante um período correspondente a 1 hora, quer para as posições obtidas dos dados GPS (azul), quer destas em conjunto com os do GLONASS (vermelho).

A figura 9.1 diz respeito à representação 2D, da altitude, em metros, durante esse período de tempo, em segundos. Como se pode observar, é de realçar que os valores de altitude para o GPS se alteraram com o tempo, com uma variação de cerca de 5 metros entre valores extremos, portanto, de acordo com o padrão de exatidão estabelecido para

o sistema. Por outro lado, a informação combinada com o GLONASS, aumentou para uma altitude superior, porém a variação manteve-se igual.

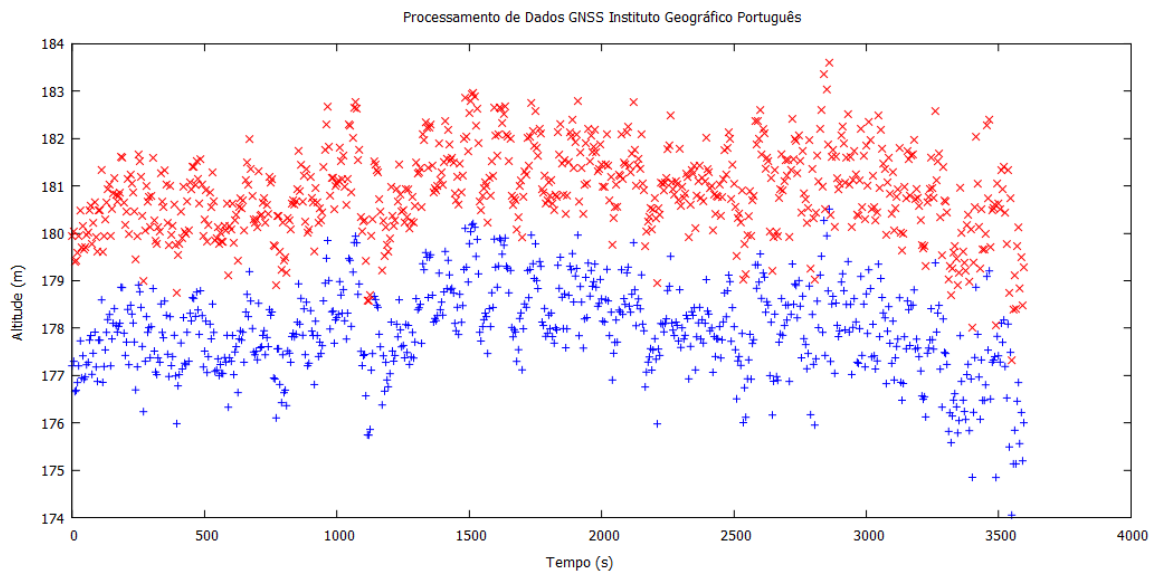


Figura 9.1 – Dispersão da altitude obtida por GPS e GPS+GLONASS em função do tempo.

A figura 9.2, com representação em 2D, da longitude e latitude em graus, demonstra que os valores destas componentes têm uma variação em graus bastante diminuta, correspondente a cerca de 4 metros, também ela dentro do padrão. O facto de se utilizar a combinação com os valores do GLONASS, demonstra que a posição é melhorada, dados os vários valores se encontrarem menos dispersos e com as variações visíveis.

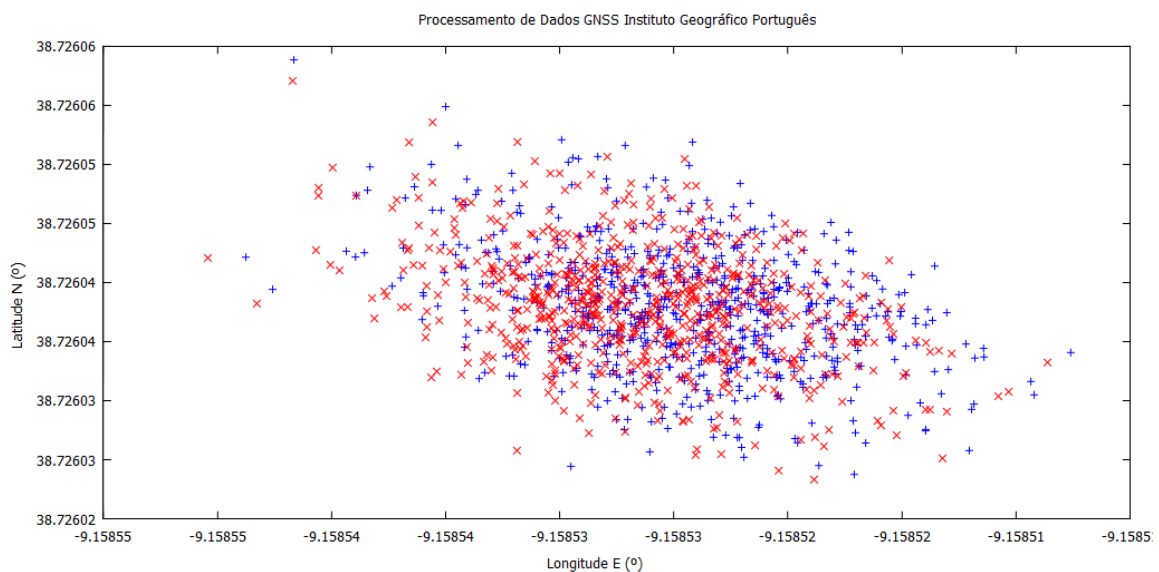


Figura 9.2 – Posições geográficas obtidas por GPS e GPS+GLONASS.

Por último, a figura 9.3 em 3D, com informação da latitude e longitude em graus e altitude em metros, permitiu verificar a dispersão espacial, na qual se denota que os valores foram mais convergentes perto dos 179 metros, mantendo da mesma forma os padrões GPS e combinados dos sistemas.

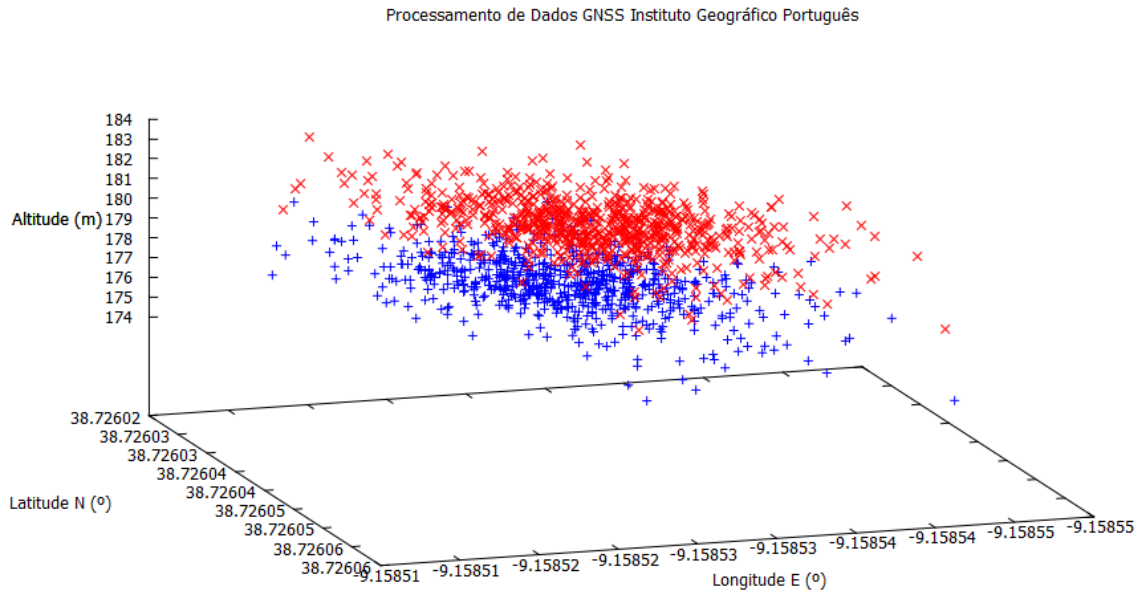


Figura 9.3 – Dispersão espacial das posições geográficas em função da altitude obtidas por GPS e GPS+GLONASS.

Para os dados adquiridos desta estação foi realizada uma tabela estatística, de onde se retira os valores da estimativa da posição em 2 D e 3 D, com uma probabilidade de 65% e 61% respetivamente.

O DRMS (*Distance Root Mean Squared*) é o raio da circunferência, centrada na posição verdadeira, contendo a estimativa da posição em 2D, com uma probabilidade de 65%. A fim de calcular este valor de erro de posição horizontal, foram utilizados os desvios padrão dos valores obtidos das posições conhecidas em (X,Y) referentes ao modelo ECEF.

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (9.1)$$

O MRSE (*Mean Radial Spherical Error*) é o raio da esfera, centrada na posição verdadeira, contendo a estimativa da posição em 3D, com uma probabilidade de 61%. A fim de calcular este valor de erro de posição espacial, foram utilizados os desvios padrão dos valores obtidos das posições conhecidas em (X,Y,Z) referentes ao modelo ECEF.

$$MRSE = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (9.2)$$

	X (m)	Y (m)	Z (m)	2D (cm)	3D (cm)
Média GPS	4919030	-793055,3616	3968750	-	-
Média GPS+GLONASS	4919030	-793055,8704	3968750	-	-
Desvio Padrão GPS	0,9161	0,4198	0,6146	-	-
Desvio Padrão GPS+GLONASS	0,8932	0,4224	0,6017	-	-
DRMS GPS (65%)	-	-	-	100,7705934	-
DRMS GPS+GLONASS (65%)	-	-	-	98,8042509	-
MRSE GPS (61%)	-	-	-	-	118,0340802
MRSE GPS+GLONASS (61%)	-	-	-	-	115,6836587

Tabela 9.1 – Estatística de medidas de exatidão de posicionamento para estação estática.

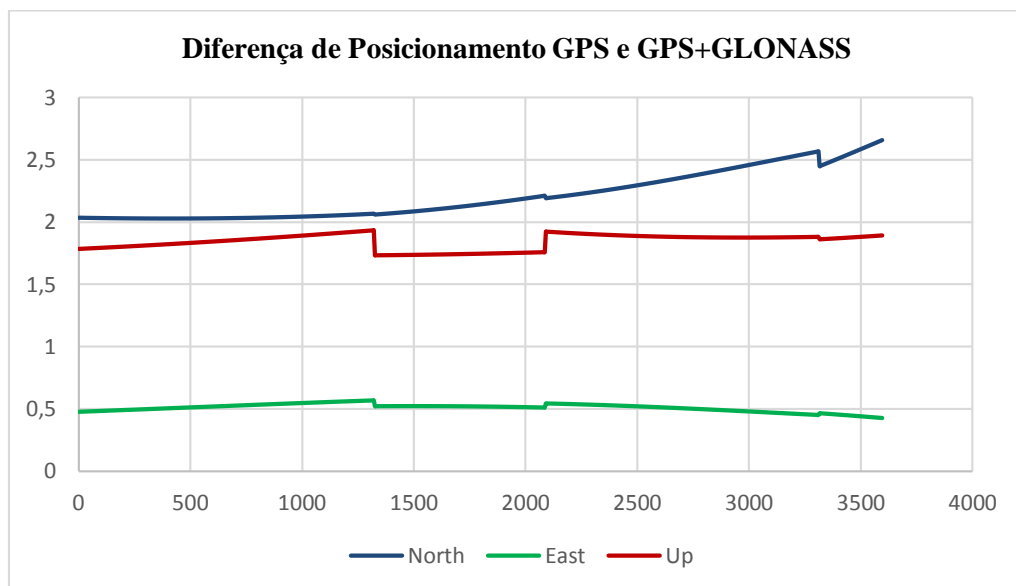


Figura 9.4 – Diferença de posicionamento com coordenadas NEU (*North East Up*) GPS e GPS+GLONASS.

Conforme a posição geográfica fornecida pelo IGEO, é assim possível concluir destas três imagens com os gráficos, assim como da tabela, que os valores obtidos e corrigidos

a partir do programa são coerentes. Por outro lado no gráfico da figura 9.4 com as diferenças dos sistemas, apenas podemos verificar que houve pequenas alterações com a utilização independente ou combinada do GPS, e que os decréscimos de cada uma das componentes de coordenadas, possa ter ocorrido devido à degradação ou erros na receção do sinal, durante o período exposto. Assim, para estações estáticas, esta primeira versão é passível de ser utilizada.

9.4.2. Estação em Movimento

Foi realizado o processamento de dados da estação em movimento, TRIMBLE 4000SSE, localizada a BB do NRP Auriga, com dados referentes a 25 de junho de 2007, de uma navegação realizado por este navio, com um intervalo de 1 segundo, permitiu analisá-los e corrigir as posições durante determinado período de tempo decorrido no movimento, para as observações obtidas dos dados GPS.

A figura 9.5 em 2D, da altitude, em metros, durante um determinado período de tempo, em segundos, mostra que os valores de altitude variam, não só devido a determinação da posição pelo satélite, como oscila devido à agitação marítima. Apesar disto, e de o navio se ter encontrado em movimento durante a obtenção destes dados, é de realçar a discrepância de apenas 4 metros, dentro do padrão GPS, conforme referido no capítulo respeitante a este sistema.

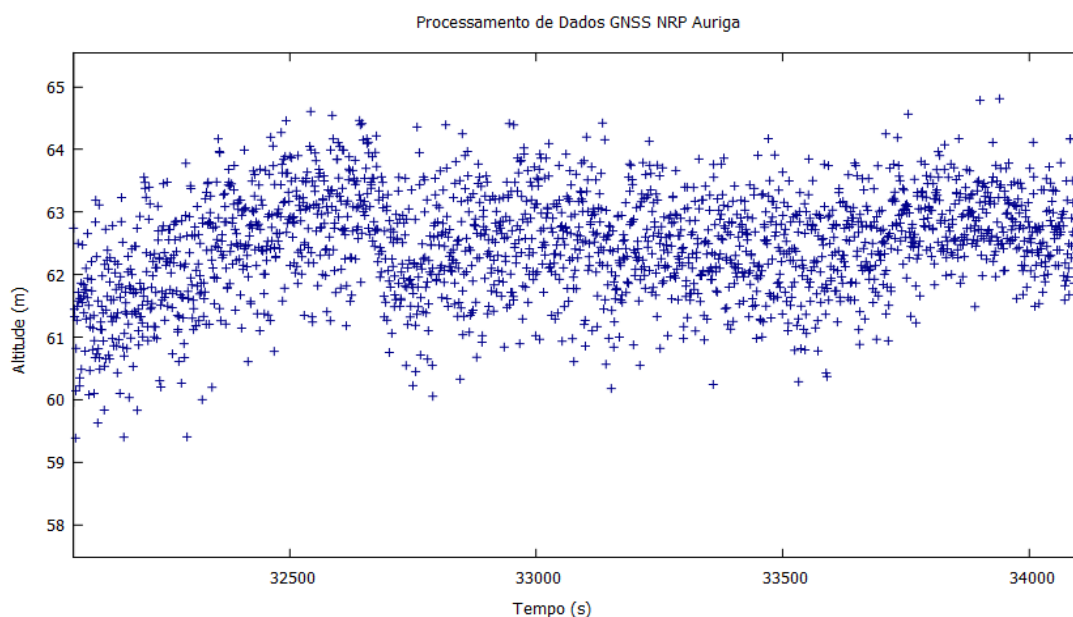


Figura 9.5 – Dispersão da altitude obtida por GPS em função do tempo e da agitação marítima.

A figura 9.6 com uma representação em 2D, da longitude e latitude em graus, ao contrário da estação estática, permite-nos verificar a trajetória do navio ao longo da superfície da água e as guinadas por este efetuadas. Embora não se consiga retirar valores concretos da exatidão ou precisão durante este movimento, é uma ferramenta importante, pois permite-nos utilizá-la num âmbito específico, para o cálculo de distâncias percorridas ou verificar quais os locais por onde o navio andou a navegar com maior rigor, devido às correções realizadas para eliminar os erros de propagação do sinal.

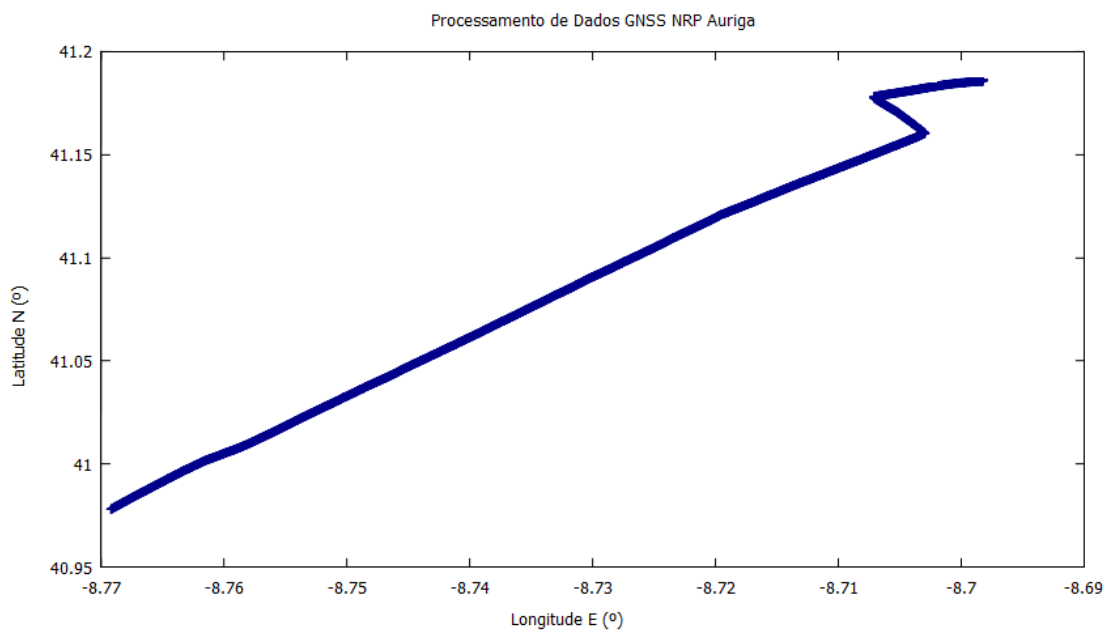


Figura 9.6 – Posições geográficas obtidas por GPS durante a trajetória percorrida pelo navio.

Por último, a figura 9.7 em 3D, com informação da latitude e longitude em graus e altitude em metros, permitiu verificar a dispersão espacial, na qual se denota os valores de altitude recorrentes do pequeno erro de posicionamento GPS e da agitação marítima, ao longo do movimento do navio hidrográfico. Utilizando as posições onde ocorreu as mudanças de rumo, e introduzi-las num sistema de informação geográfica, verifica-se que este saiu do Porto de Leixões e guinou de forma a afastar-se deste porto.

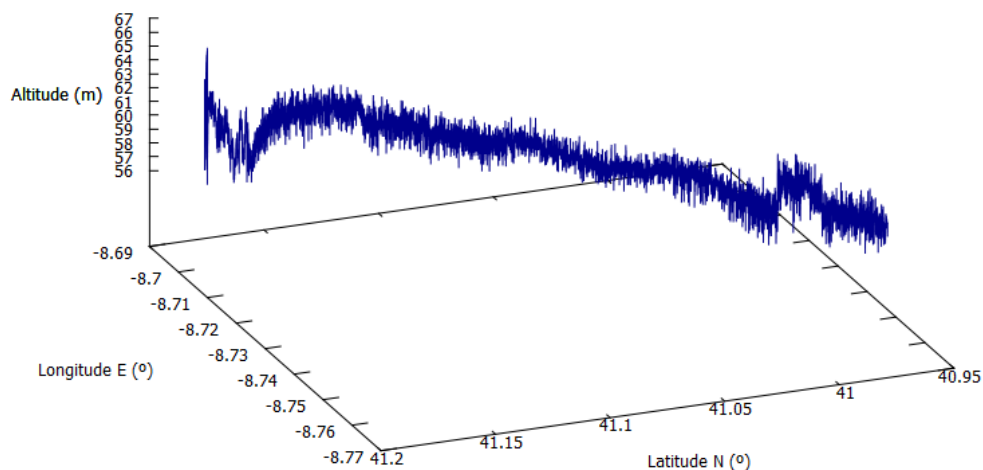


Figura 9.7 – Dispersão espacial das posições geográficas em função da altitude e da agitação marítima durante a trajetória obtidas por GPS.

Este programa é assim passível de também ser utilizado para o processamento de dados de estações em movimento. Caso existissem dados da sonda à hora, juntamente com a altura do zero hidrográfico estabelecido para este local e conhecendo os valores da posição da antena, era uma ferramenta importante em levantamentos hidrográficos, semelhante à técnica PPP, pois poder-se-ia ainda obter a sonda reduzida para o local, onde o NRP Auriga navegou.

Capítulo 10. Considerações Finais

Com a evolução e o desenvolvimento dos sistemas de navegação por satélite, a partir do GPS, que até há década passada era o único GNSS existente no mercado, o surgimento de novos e melhorados sistemas veio beneficiar toda a comunidade internacional e, proporcionar qualidade e precisão no posicionamento e tempo, imprescindíveis a uma diversidade de atividades que todos os dias requerem altos padrões destes sistemas.

Desde o lançamento do primeiro satélite *Sputnik*, foram lançados 240 satélites pelos sistemas globais e regionais de navegação, encontrando-se, à data de 31 de Julho de 2015, 91 satélites em órbita, dos quais, 76 estão operacionais e 15 estão manutenção ou preparação. Para além destes, são utilizados ainda 13 satélites operacionais pelos sistemas de aumento. Estes valores revelam a extrema importância e o avultado investimento, tecnológico e financeiro, que tem sido atribuído aos sistemas de posicionamento por satélite, a nível mundial, com tendência para incrementar no futuro. Esta análise, só por si, justifica que se continue a acompanhar os avanços nesta área de atividade.

Com a interoperabilidade como o principal passo, que todos os sistemas existentes tentam atingir e que será o futuro do GNSS, para além da diversidade de sinais que disponibilizam e disponibilizarão, será de esperar que na próxima década mais de 100 satélites se encontrem em órbita, com o início da fase operacional dos novos sistemas Galileo e BeiDou, juntamente com os já existentes GPS e GLONASS. Deste modo, irá aumentar consideravelmente o número de satélites visíveis, a partir de qualquer ponto na superfície terrestre, melhorando significativamente a qualidade do serviço ao utilizador.

A existência de um maior número de sinais, possíveis de integrar com outras tecnologias, significará melhores correções aos erros de propagação, maior resistência a interferências e empastelamento, melhor monitorização da integridade do sistema e um maior o número de observações disponíveis para a resolução das equações para a determinação da solução PVT.

Na verdade, a alta precisão requerida e a interoperabilidade, não são apenas uma questão de conveniência ou robustez, dado cada vez mais as soluções fiáveis e seguras serem necessárias em áreas específicas, no nosso caso da navegação e das operações navais. No entanto, para se conseguirem atingir todos estes objetivos referidos, a modulação do sinal

ou os padrões de tempo, por exemplo, terão de ser melhorados, de forma a permitir utilização e a compatibilidade entre eles, em qualquer altura, em qualquer lugar.

O DGNSS é um dos métodos de posicionamento viáveis de continuar a ser usado, nomeadamente no auxílio à tomada de decisão. A principal vantagem do DGNSS está em melhorar a exatidão obtida, pois é da mesma ordem da que se obtém em modo absoluto, ou seja, em capacitar os Estados onde estão localizadas as estações, com informação em tempo real sobre a integridade do sistema que pode ser difundida e alertar, em tempo útil, todos os utilizadores, no caso de se detetar uma anomalia.

O GNSS está assim, verdadeiramente integrado no mercado global e disponível para o utilizador em geral e para fins militares, com tecnologias do recetor mais eficientes e menos onerosas e, com uma exatidão centimétrica incorporada para processos de alta precisão, permitindo ser suscetível de se tornar muito mais ubíqua na próxima década.

10.1. Conclusões

A análise descritiva de cada um dos sistemas de navegação por satélite que compõem o GNSS, permitiu aprofundar os conhecimentos sobre estes, em complemento aos adquiridos durante o curso. Esta análise resultou de um trabalho de síntese e organização da informação, de um tema complexo sobre o qual muito há por desenvolver e aprofundar.

A descrição do GNSS, apresentada neste estudo constitui-se como uma referência que pode servir como base de estudo, que possibilitará aos alunos do mestrado integrado da Escola Naval, ter esta como orientação a nível bibliográfico, nas unidades curriculares de Navegação e Hidrografia, permitindo aprofundar o conhecimento nesta área técnica. Este trabalho permitiu também retirar ilações sobre as linhas de orientação para o desenvolvimento futuro do GNSS e da interoperabilidade entre os sistemas. O trabalho descritivo foi também de grande utilidade ao nível de aquisição de conhecimentos, para permitir compreender os resultados obtidos com o programa de processamento de dados.

De uma forma sintética, o sistema GPS, sendo o mais antigo dos sistemas, daqui em diante prevê-se que faça melhorias na sua arquitetura base, da mesma forma que o GLONASS, apostando em sinais mais robustos e interoperáveis para a componente civil e no melhoramento do sistema de monitorização e controlo, para além do lançamento de novos e melhorados satélites que virão a substituir os existentes. Os novos sistemas

continuarão o seu desenvolvimento, no caso do BeiDou, passando para a componente global de disponibilização dos serviços, e do Galileo, de forma a atingir a plena capacidade até ao fim desta década, com a transmissão dos serviços para a comunidade civil e militar. Os sistemas regionais, QZSS e IRNSS, irão apostar respetivamente, no segmento de controlo e segmento espacial, em via de ter uma estrutura mais robusta e que permita um maior comando e controlo e possuir a constelação de satélites prevista.

Com a componente prática, correspondente ao desenvolvimento de uma aplicação para o processamento de dados GNSS, a Escola Naval passou a ter disponível um protótipo do seu próprio *software*, embora ainda numa fase inicial e com limitações. Através deste, é possível fazer o pós-processamento de dados dos sistemas GPS e GLONASS, embora ainda de forma pouco abrangente, e retirar informações de latitude, longitude e altitude, de um objeto em movimento ou estático. Os resultados obtidos e expressos em gráficos como se pode visualizar nas imagens do capítulo anterior, permitiram verificar e aprovar o programa como um elemento de confiança e passível de ser utilizado.

Na estação estática, a única informação que não parece ser muito credível, foi a obtida no gráfico da altitude em função do tempo, uma vez que a posição corrigida dos dois sistemas, foi uma sobreposição para uma altura superior em relação ao do sistema GPS autónomo, mantendo as posições relativas das várias observações. As restantes imagens denotam que houve ligeiras correções no posicionamento, quando utilizado os sistemas combinados, sendo os resultados estatísticos da tabela, uma prova de que o erro espacial e horizontal estava dentro dos padrões dos sistemas, tal como através da figura com as coordenadas *North East Up*, para os mesmos dados utilizados.

Na estação em movimento não houve qualquer divagação dos resultados, apesar da análise da altitude em função do tempo decorrido, não ser possível de distinguir as variações dos erros dos satélites e da agitação marítima, dado não existir dados sobre esses fatores oceanográficos e também essa análise não ser o objetivo principal deste trabalho.

10.2. Recomendações

Decorrente do desenvolvimento dos sistemas de posicionamento por satélite e consequentemente do GNSS, previsto para os próximos anos, recomenda-se que se continue a acompanhar a evolução destes sistemas e o consequente impacto para a Marinha. Este acompanhamento dos avanços tecnológicos ao nível do GNSS é muito

importante para a integridade e resistência a interferências dos sistemas de navegação a bordo dos navios, designadamente em ambiente hostil.

Embora se encontre operacional e operável por qualquer pessoa que tenha noções básicas de programação e tratamento de dados, a aplicação desenvolvida neste trabalho necessita de avultadas melhorias, para que se torne mais fácil de utilizar e permita obter resultados de melhor qualidade e rigor. Sendo uma aplicação suscetível de ser facilmente parametrizável, com recurso às rotinas de utilização livre do GPSTk, em linguagem C++, é recomendável que a nível futuro este seja desenvolvido, para que disponha dos seguintes pontos:

- Melhorar o aspeto gráfico do programa ao nível do utilizador com o interface atrativo e eficiente;
- Adicionar campos que permitam a utilização dos vários sistemas de posicionamento por satélite que compõem o GNSS, de forma independente e interoperável;
- Tornar a visualização dos resultados mais perceptível e incluir gráficos 2D e 3D, que permitam uma observação gráfica imediata à medida que os dados vão sendo processados, de forma a serem parametrizados pelo utilizador;
- Incluir dados de outros sensores de navegação, por exemplo sensores inerciais e integrar, de forma ótima, com os dados GNSS;
- Integrar os sistemas Galileo e BeiDou, para que se possa recolher informação útil a partir dos dados das efemérides transmitidas num determinado sinal recebido por uma estação móvel ou estática que tenha essa capacidade.

Este programa denota uma elevada importância e relevância, daí ser pertinente que seja continuado e melhorado em futuras dissertações de mestrado. Através dele será possível processar, por exemplo, os dados de ROV's (*Remotely Operated Vehicle*) e/ou UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) criados pela Escola Naval, no âmbito dos projetos do Centro de Investigação Naval, ou mesmo, poder vir a ser integrado mais tarde nestes e, ser computadorizado a partir de terra em tempo real, dando um amplo espetro de aplicações bastante relevantes, para o futuro da Marinha Portuguesa.

Bibliografia

- Aeronautics and Space Engineering Board National Research Council. (1995). *The Global Positioning System: A Shared National Asset*. Washington: National Academies Press.
- Air Force Space Command. (14 de Junho de 2013). *AFSPC Tests GPS Civil Signals L2C and L5*. Obtido de Air Force Space Command: <http://www.afspc.af.mil/news1/story.asp?id=123352588>
- Alexey, B. (2014). GLONASS Open Service Performance Parameters Standard and GNSS Open Service Performance Parameters Template Status. Moscow: Russian Federal Space Agency.
- Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin. (5 de Dezembro de 2013a). *Overview*. Obtido de GPSTk: <http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/WebHome>
- Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin. (5 de Dezembro de 2013b). *What is GPSTk?* Obtido de GPSTk : <http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/WebHome>
- Ávila Rodríguez, J. Á. (2008). *On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation*. Munich: Universidade de Munich.
- Bahrani, M., & Ziebart, M. (2012). GNSS Geodetic Reference Frames: Consistency, Stability and the Related Transformation Parameters. *24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*. Portland: National Physical Laboratory.
- Baijal, R., & Arora, M. K. (2001). *GPS: A military perspective*. Obtido de Geospatial World: <http://geospatialworld.net/Paper/Technology/ArticleView.aspx?aid=1931>
- Baltarejo, P., & Santos, J. (2006). *Apontamentos de Programação em C/C++*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Barroso, J. M. (2012). Commission Implementing Decision of 23 February 2012 establishing a list of key decision points to evaluate the implementation of the Galileo programme with regard to the ground-based centres and stations to be created as part of the programme development. *Official Journal of the European Communities*.
- Bartolomé, J. P., Maufruid, X., Hernández, I. F., Salcedo, J. A., & Granados, G. S. (2014). Overview of Galileo System. Em J. Nurmi, E. S. Lohan, S. Sand, & H. Hurskainen, *Galileo Positioning Technology*. New York: Springer.
- Baryshnikov, M., Shargorodsky, V. B., & Vasiliev, V. (2010). *Status of the Russian Laser Tracking Network*. Russia.

- BBC News. (8 de Março de 2012). *China GPS rival Beidou starts offering navigation data*. Obtido de BBC News: <http://www.bbc.com/news/technology-16337648>
- BeiDou Navigation Satellite System. (s.d.a). *Construction principles*. Obtido de BeiDou Navigation Satellite System: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/2012121453762790daeb4fd1aef4d4d5c94b4c35.html>
- BeiDou Navigation Satellite System. (s.d.b). *Development plan*. Obtido de BeiDou Navigation Satellite System: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/2012121481ba700d7ca84dfc9ab2ab9ff33d2772.html>
- BeiDou Navigation Satellite System. (s.d.c). *Service target*. Obtido de BeiDou Navigation Satellite System: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/20121214617d2d7b70334862a052d58bbf38beea.html>
- BeiDou Navigation Satellite System. (s.d.d). *Survey*. Obtido de BeiDou Navigation Satellite System: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/201212142e8f29c30e0d464c9b34d6828706f81a.html>
- Bell, J. (2010). *Como realizar um projecto de investigação?* Lisboa: Gradiva.
- Benedicto, J., Dinwiddy, S. E., Gatti, G., Lucas, R., & Lugert, M. (2000). *GALILEO: Satellite System Design and Technology Developments*. Noordwijk: European Space Agency.
- Bhaskaranarayana, A. (2008). Indian IRNSS and GAGAN. *COSPAR Meeting*. Montreal: Indian Space Research Organization.
- Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*.
- Chen, J. (2011). Analysis of the GNSS Augmentation Technology Architecture. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*. Pequim.
- Chen, J., Wu, B., Hu, X., Zhou, S., Cao, Y., Wu, X., & Xing, N. (2012). Compass/Beidou: System Status and Initial Service. *IGS Workshop on GNSS Biases*. Universidade de Bern: Shanghai Astronomical Observatory.
- Chengqi, R. (s.d.). *The Construction and Development of Beidou Navigation Satellite System*. Obtido de BeiDou Navigation Satellite System: <http://www.beidou.gov.cn/2013/09/29/2013092903db7281fa3f43b9aaeb1cb65d606b1a.html>

- China Satellite Navigation Office. (2011). Development of the BeiDou Navigation Satellite System. *Meeting Institute of Navigation Global Navigation Satellite System*. Portland: China Satellite Navigation Office.
- China Satellite Navigation Office. (2012a). Development of BeiDou Navigation Satellite System. *7th Meeting of International Committee on GNSS*. Pequim.
- China Satellite Navigation Office. (2012b). *Report on the Development of BeiDou Navigation Satellite System*. China: China Satellite Navigation Office.
- China Satellite Navigation Office. (2013a). *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard*. China: China Satellite Navigation Office.
- China Satellite Navigation Office. (2013b). *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document*. China: China Satellite Navigation Office.
- China Satellite Navigation Project Center. (2008). Compass/Beidou Navigation Satellite System Development. *International Committee on GNSS*. Pasadena: China Satellite Navigation Project Center.
- Clore, R. E. (2011). U.S. GPS Policy and Constellation Status. *5th International Satellite Navigation Forum*. Moscow: Office of Space and Advanced Technology.
- Colo Aurora. (19 de Janeiro de 2011). *Raytheon to Open GPS Collaboration Center in Southern California*. Obtido de Raytheon Company: http://investor.raytheon.com/phoenix.zhtml?c=84193&p=irol-newsArticle_Print&ID=1517243
- Conn, T., Gaussiran, T., Harris, R. B., Little, J., Mach, R., Munton, D., . . . Craddock, T. (2012). *The GPS Toolkit: A User's Guide for Scientists, Engineers and Students*. Texas: Universidade do Texas em Austin.
- Danchik, R. J. (1998). An Overview of Transit Development. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 19.
- Davies, K. (1989). *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus.
- Davis, L. A., Enge, P. K., & Gao, G. X. (2012). Global Navigation Satellite Systems. *Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. Washington: National Academy of Engineering.
- Department of Transportation United States of America. (2001). *Specification for the Wide Area Augmentation System (WAAS)*. Washington: Federal Aviation Administration .
- Dingding, X. (28 de Dezembro de 2011). *Satellite navigation system launched*. Obtido de China Daily: http://europe.chinadaily.com.cn/business/2011-12/28/content_14343656.htm

- Divis, D. A. (14 de Novembro de 2014). *First GPS III Launch Slips to FY17*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/4270>
- Dow, J., & Altamimi, Z. (2007). Standardisation of Geodetic Reference Frames for GNSS based on ITRF. *2nd Meeting of the International Committee on GNSS*. Bangalore.
- Eldredge, L. (2011). GNSS Program Status. *CNS-ATM Conference*. Orlando: Federal Aviation Administration.
- Encyclopedia Astronautica. (s.d.a). *Glonass*. Obtido de Encyclopedia Astronautica: <http://www.astronautix.com/craft/glonass.htm>
- Encyclopedia Astronautica. (s.d.b). *Transit*. Obtido de Encyclopedia Astronautica: <http://www.astronautix.com/craft/transit.htm#more>
- European Commission. (18 de Janeiro de 2001). *Mid-term review of the European satellite radio navigation programmes*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (7 de Janeiro de 2010). *Commission awards major contracts to make Galileo operational early 2014*. Obtido de European Commission: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-10-7_en.htm
- European Commission. (5 de Fevereiro de 2013a). *Galileo: Public Regulated Services*. Obtido de European Commission: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/applications/public-regulated-services/index_en.htm
- European Commission. (4 de Abril de 2013b). *Programme*. Obtido de European Commission: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/programme/index_en.htm
- European Commission. (28 de Junho de 2014a). *Galileo OS SIS ICD (Open Service Signal-In-Space Interface Control)*. Obtido de European Commission: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/open-service/index_en.htm
- European Commission. (26 de Agosto de 2014b). *Galileo - What do we want to achieve ?* Obtido de European Commission: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/index_en.htm
- European Commission. (10 de Junho de 2015). *EGNOS*. Obtido de European Commission: <http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/egnosc/>
- European Commission & European Space Agency. (23 de Setembro de 2002). *Mission High Level Definition*. European Commission.
- European Geostationary Navigation Overlay Service. (2009). *User Guide for EGNOS Application Developers*. Toulouse: EGNOS Project Office.
- European GNSS Agency. (2014a). *EGNOS Data Access Service (EDAS) Service Definition Document*. Prague: European GNSS Agency.

- European GNSS Agency. (2014b). *EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document*. Prague: European GNSS Agency.
- European GNSS Agency. (2014c). *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document*. Prague: European GNSS Agency.
- European GNSS Agency. (24 de Março de 2014d). *EGNOS Capability and Service Enhanced with Addition of New Generation Transponders*. Obtido de European Global Navigation Satellite Systems Agency: <http://www.gsa.europa.eu/news/egnos-capability-and-service-enhanced-addition-new-generation-transponders>
- European GNSS Agency. (30 de Junho de 2014e). *First Signal-In-Space tests of the Galileo Commercial Service Demonstrator*. Obtido de EGNOS: <http://egnos-portal.gsa.europa.eu/news/first-signal-space-tests-galileo-commercial-service-demonstrator>
- European GNSS Agency. (s.d.a). *About EGNOS*. Obtido de EGNOS: <http://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos>
- European GNSS Agency. (s.d.b). *Benefits*. Obtido de European GNSS Agency: <http://www.gsa.europa.eu/galileo/benefits>
- European GNSS Agency. (s.d.c). *International Co-operation*. Obtido de European GNSS Agency: <http://www.gsa.europa.eu/galileo/international-co-operation>
- European GNSS Agency. (s.d.d). *What is SBAS?* Obtido de EGNOS: <http://egnos-portal.gsa.europa.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>
- European Space Agency. (2003). *Business in Satellite Navigation: An overview of market developments*. European Space Agency.
- European Space Agency. (6 de Junho de 2007a). *Maritime*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Navigation_Applications/Maritime
- European Space Agency. (16 de Agosto de 2007b). *Galileo System*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_system
- European Space Agency. (1 de Julho de 2010a). *Galileo Services*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_services
- European Space Agency. (24 de Novembro de 2010b). *SISNet Into 10th Year of Providing Precise SatNav Online*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_present_-_EGNOS/SISNeT_into_10th_year_of_providing_precise_satnav_online
- European Space Agency. (2012). *Galileo Terrestrial Reference Frame*.

- European Space Agency. (2013a). *Galileo Full Operational Capability Procurement*. European Space Agency.
- European Space Agency. (2013b). *Galileo In-Orbit Validation*. European Space Agency.
- European Space Agency. (14 de Janeiro de 2013c). *About Satellite Navigation*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/About_satellite_navigation2
- European Space Agency. (10 de Fevereiro de 2014a). *Galileo Works, and Works Well*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_works_and_works_well
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014b). *First Results*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/First_results
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014c). *Galileo on the Ground*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_on_the_ground
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014d). *Galileo: A constellation of 30 Navigation Satellites*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_a_constellation_of_30_navigation_satellites
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014e). *Next Steps*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Next_steps
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014f). *What is Galileo?* Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo
- European Space Agency. (27 de Junho de 2014g). *Why Europe Needs Galileo*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Why_Europe_needs_Galileo
- European Space Agency. (3 de Março de 2015). *About the European GNSS Evolution Programme*. Obtido de European Space Agency: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/GNSS_Evolution/About_the_European_GNSS_Evolution_Programme
- European Union. (2014). *Signal In Space Interface Control Document*. Brussels: European Union.

- Federal Aviation Administration. (2008). *Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard*. Washington: Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration. (17 de Outubro de 2014a). *Satellite Navigation - Wide Area Augmentation System (WAAS)*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/waas/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014b). *Satellite Navigation - Global Positioning System (GPS)*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014c). *Satellite Navigation - GPS - Control Segment*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/controlsegments/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014d). *Satellite Navigation - GPS - Policy - Modernization*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/policy/modernization/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014e). *Satellite Navigation - GPS - Policy - Selective Availability*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/policy/availability/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014f). *Satellite Navigation - GPS - Space Segment*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/spacesegments/
- Federal Aviation Administration. (13 de Novembro de 2014g). *Satellite Navigation - GPS - User Segment*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/usersegments/
- Federal Aviation Administration. (19 de Fevereiro de 2015a). *Navigation Programs - WAAS - News*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration:

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/waas/news/

Federal Aviation Administration. (15 de Junho de 2015b). *Satellite Navigation - GPS - How It Works*. Obtido de U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration:

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/tech_ops/navservices/gnss/gps/howitworks/

Federal Space Agency. (2008). System of Differential Correction and Monitoring (SDCM) Current status. *Russian Institute of Space Device Engineering*. Moscow: Russian Federal Space Agency.

Federal Space Agency. (Março de 2008). What's Next for WAAS? *SatNav News*, 33.

Federal Space Agency. (23 de Maio de 2011). *Qualcomm Incorporated now has product support for the Russian GLONASS satellite system*. Obtido de Federal Space Agency Information Analytical Centre: https://www.glonass-iac.ru/en/content/news/?ELEMENT_ID=116

Federal Space Agency. (2013). SDCM development program status. *25th Meeting of Interoperability Working Group*. St. Petersburg: Russian Federal Space Agency.

Federal Space Agency. (8 de Abril de 2014). *The transition to using the terrestrial geocentric coordinate system "Parametry Zemli 1990" (PZ-90.11) in operating the GLOBAL NAVigation Satellite System (GLONASS) has been implemented*. Obtido de Federal Space Agency Information Analytical Centre: https://www.glonass-iac.ru/en/content/news/?ELEMENT_ID=721

Federal Space Agency. (s.d.a). *Navigation space systems of the I generation*. Obtido de Federal Space Agency Information Analytical Centre: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>

Federal Space Agency. (s.d.b). *Navigation space systems of the II generation*. Obtido de Federal Space Agency Information Analytical Centre: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>

Federal Space Agency. (s.d.c). *Navigation space systems of the III generation*. Obtido de Federal Space Agency Information Analytical Centre: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>

Feng, Y. (2003). Combined Galileo and GPS: A Technical Perspective. *Journal of Global Positioning Systems*, 1.

Fontana, R. D., Cheung, W., & Stansell, T. (2001). *The Modernized L2 Civil Signal: Leaping Forward in the 21st Century*.

Gadimova, S. (2014). International Committee on Global Navigation Satellite Systems and its Programme on the Applications of Global Navigation Satellite Systems.

54th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee. Tampa: International Committee on Global Navigation Satellite Systems.

Galileo Geodetic Service Provider. (s.d.). *The Galileo Geodetic Service Provider Prototype*. Obtido de Galileo Geodetic Service Provider: http://www.ggsp.eu/ggsp_home.html

Galo, M. (2003). *Introdução ao uso do aplicativo Gnuplot*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista.

Gianni, D., Fuchs, J., Simone, P. D., & Lisi, M. (2012). *A Modelling Language to Support the Interoperability of Global Navigation Satellite Systems*. Springer Verlag.

Gibbons, G. (19 de Agosto de 2009). *Russia Building Out GLONASS Monitoring Network, Augmentation System*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/1631>

GLobal NAVigation Satellite System. (s.d.a). *GLONASS + GPS: Advantages*. Obtido de GLobal NAVigation Satellite System: <http://www.glonass.it/eng/glonass-advantages.aspx>

GLobal NAVigation Satellite System. (s.d.b). *GLONASS System*. Obtido de GLobal NAVigation Satellite System: <http://www.glonass.it/eng/glonass-story.aspx/>

Gonçalves, A. R. (2011). *Navegação e Determinação de Atitude em Aeronaves Através de Múltiplos Receptores GNSS*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.

GPS World Staff. (Fevereiro de 2002). NovAtel Gains China Order. *GPS World*. Obtido de GPS World.

GPS World Staff. (2 de Janeiro de 2013a). *BeiDou ICD Released*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/beidou-icd-released/>

GPS World Staff. (1 de Fevereiro de 2013b). *The System: BeiDou ICD, Galileo-Only Positioning*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/the-system-beidou-icd-galileo-only-positioning/>

GPS World Staff. (13 de Janeiro de 2014a). *GAGAN Certified for Aviation in India*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/gagan-certified-for-aviation-in-india/>

GPS World Staff. (10 de Fevereiro de 2014b). *Galileo Achieves In-Orbit Validation*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/galileo-achieves-in-orbit-validation/>

GPS World Staff. (21 de Maio de 2015). *Both New Galileo Satellites Now Transmitting*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/newest-galileo-satellites-now-transmitting/>

Grawitz, M. (1993). *Méthodes des Sciences Sociales*. Paris: Dalloz.

- Grayzeck, E. (26 de Agosto de 2014). *Spacecraft Query*. Obtido de National Aeronautics and Space Administration: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>
- Grimes, J. G. (2007). *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard*. Washington: U.S. Department of Defense.
- Grimes, J. G. (2008a). *Global Positioning System (GPS) 2008: A Report to Congress*. Washington: U.S. Department of Defense.
- Grimes, J. G. (2008b). *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. Washington: U.S. Department of Defense.
- Gruber, B. (2010). GPS Modernization and Program Update. *Stanford Center for PNT Symposium*. Stanford: Space and Missile Systems Center.
- Guier, W. H., & Weiffenbach, G. C. (1998). Genesis of Satellite Navigation. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 19.
- Gunter Space. (s.d.a). *Satellites of China*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_china.htm
- Gunter Space. (s.d.b). *Satellites of Europe (ESA)*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_europe.htm
- Gunter Space. (s.d.c). *Satellites of India*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_india.htm
- Gunter Space. (s.d.d). *Satellites of Japan*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_japan.htm
- Gunter Space. (s.d.e). *Satellites of the USA*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_usa.htm
- Gunter Space. (s.d.f). *Satellites of the USSR / Russia*. Obtido de Gunter Space: http://space.skyrocket.de/directories/sat_c_ussr_russia.htm
- Gurtner, W., & Estey, L. (2013). RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02. *International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104)*,.
- Gurtner, W., & Mader, G. M. (27 de Janeiro de 2011). *The RINEX Format: Current Status, Future Development*. Obtido de U.S. Coast Guard Navigation Center: <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=RINEX>
- Harris, R. B., & Mach, R. G. (Março de 2007). The GPSTk: an open source GPS toolkit. *GPS Solutions*, 11. Obtido de National Geodetic Survey: <http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/Mach.htm>

- Hattacharjya, S., & Sunda, S. (2013). GNSS Status in India. *3rd Meeting of Ionospheric Studies Task Force*. Seoul: Airports Authority of India.
- He, L., Ge, M., Wang, J., Wickert, J., & Schuh, H. (2013). Experimental Study on the Precise Orbit Determination of the BeiDou Navigation Satellite System. *Sensors*.
- Hegarty, C. J., & Chatre, E. (Dezembro de 2008). Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS). *Proceedings of the IEEE Volume 96*.
- Hein, G. W. (2006). *GNSS Interoperability: Achieving a Global System of Systems or "Does Everything Have to Be the Same?"*. 2006: Inside GNSS.
- Hein, G. W. (2010). Galileo and GNSS under Development 2 - Compass/ BeiDou, IRNSS and QZSS. *ESA International Summer School on GNSS*. Sletterstrand.
- Hein, G. W., & Pany, T. (2002). Architecture and Signal Design of the European Satellite Navigation System Galileo. *Journal of Global Positioning Systems*(1).
- Hein, G. W., Irsigler, M., Ávila-Rodríguez, J. A., Wallner, S., Pany, T., Eissfeller, B., & Hartl, P. (2007). Envisioning a Future: GNSS System of Systems. *Inside GNSS*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/490>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Viena: Springer.
- India Post. (21 de Dezembro de 2010). *Russia, India ink agreement to share GLONASS signals*. Obtido de India Post Voice Of Indians Worldwide: <http://www.indiapost.com/russia-india-ink-agreement-to-share-glonass-signals/>
- Indian Research Space Organization. (s.d.a). *Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)*. Obtido de Indian Research Space Organization: <http://www.isro.gov.in/irnss-programme>
- Indian Research Space Organization. (s.d.b). *Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)*. Obtido de Indian Research Space Organization: <http://irnss.isro.gov.in/>
- Indian Research Space Organization. (s.d.c). *Satellite Navigation*. Obtido de Indian Research Space Organization: <http://www.isro.org/spacecraft/satellite-navigation>
- Indian Space Projects. (s.d.). *Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)*. Obtido de Indian Space Projects: <http://isp.justthe80.com/space-applications/indian-regional-navigation-satellite-system-irnss>
- Indian Space Research Organization. (2014). *IRNSS SIS ICD for Standard Positioning Service*. Bangalore.
- Inside GNSS. (17 de Março de 2010). *Russia to Put 8 CDMA Signals on 4 GLONASS Frequencies*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/1997>

- Inside GNSS. (26 de Fevereiro de 2011). *Russia's First GLONASS-K In Orbit, CDMA Signals Coming*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/2487>
- Inside GNSS. (2 de Abril de 2013a). *Japan Awards Contracts for QZSS Space, Ground Segments*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/3510>
- Inside GNSS. (1 de Julho de 2013b). *India Launches First Navigation Satellite*. Obtido de Inside GNSS: <http://gpsworld.com/india-launches-first-navigation-satellite/>
- Inside GNSS. (25 de Julho de 2013c). *Indian Regional Navigation Satellite Starts Signal Transmissions*. Obtido de Inside GNSS: <http://gpsworld.com/indian-regional-gnss-satellite-starts-signal-transmissions/>
- Inside GNSS. (14 de Janeiro de 2014a). *India Certifies GAGAN for En Route and NPA Flight Operations*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/3846>
- Inside GNSS. (16 de Junho de 2014b). *Russia Launches CDMA Payload on GLONASS-M*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/4066>
- Inside GNSS. (28 de Março de 2015a). *Indian Launches Fourth IRNSS Spacecraft*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/4472>
- Inside GNSS. (30 de Março de 2015b). *India's IRNSS-1D Launched into Orbit*. Obtido de Inside GNSS: <http://gpsworld.com/indias-irNSS-1d-launched-into-orbit/>
- International Maritime Organization. (2002). *Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS)*. London: International Maritime Organization.
- International Maritime Organization. (26 de Novembro de 2014). *SOLAS amendments to make IGF Code mandatory approved by Maritime Safety Committee*. Obtido de International Maritime Organization: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/40-MS-C94wrap.aspx#.Vau9Pfm4SM8>
- Jain, P. K. (2008). *Indian Satellite Navigation Programme: An Update. 45th Session of S&T Subcommittee of UN-COPUOS*. India: Indian Space Research Organization.
- Japan Aerospace Exploration Agency & QZSS Project Team. (2009). *Current status of Quasi-Zenith Satellite System. 4th International Committee on GNSS*. Saint-Petersburg: Japan Aerospace Exploration Agency. Obtido de International Committee on GNSS
- Japan Aerospace Exploration Agency. (11 de Setembro de 2010). *Launch Result of the First Quasi-Zenith Satellite 'MICHIBIKI' by H-IIA Launch Vehicle No. 18*. Obtido de Japan Aerospace Exploration Agency: http://global.jaxa.jp/press/2010/09/20100911_h2af18_e.html

- Japan Aerospace Exploration Agency. (22 de Junho de 2011). *First Quasi-Zenith Satellite 'MICHIBIKI' Begins Providing Positioning Signals*. Obtido de Japan Aerospace Exploration Agency: http://global.jaxa.jp/press/2011/06/20110622_michibiki_e.html
- Japan Aerospace Exploration Agency. (2014). *Quasi-Zenith Satellite System: Interface Specification for QZSS*. Chofu: Japan Aerospace Exploration Agency.
- Japan Civil Aviation Bureau. (2007). MSAS current status. *Second Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG)*. Bangalore: Japan Civil Aviation Bureau.
- Japan Civil Aviation Bureau. (2008). Overview of MSAS MTSAT Satellite-based Augmentation System. *3rd Meeting International Committee on GNSS*. Pasadena: Japan Civil Aviation Bureau.
- Japan Meteorological Agency . (Julho de 2015). *Meteorological Satellites -Japan Meteorological Agency (JMA)*. Obtido de Japan Meteorological Agency : <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/index.html>
- Julien, O. (2005). *Design of Galileo L1F Receiver Tracking Loops*. Calgary: Universidade de Calgary.
- Júnior, P. S. (2013). *Estudo da sensibilidade de estimação da troposfera por GNSS*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista.
- Kaplan, E. D., & Hegarthy, C. J. (2006). *Understanding GPS: principles and Applications* (2ª ed.). Boston: Artech House.
- Kibe, S. V. (2008). GAGAN & IRNSS. *3rd International Committee on GNSS*. Pasadena: Indian Space Research Organization.
- Klobuchar, J. (1996). Ionospheric effects on GPS. *Global Positioning System: Theory and Applications, I*.
- Kovář, P., Vejražka, F., Seidl, L., & Kačmařík, P. (2005). Galileo Receiver Core Technologies. *Journal of Global Positioning Systems, 4*.
- Langley, R. (1 de Abril de 2011). *Innovation: GLONASS*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/innovation-glonass-11405/>
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying* (4ª ed.). New Jersey: Wiley-Interscience.
- Ley, W., Wittmann, K., & Hallmann, W. (2009). *Handbook of Space Technology*. Munich: Wiley.
- Liu, J. (Junho de 2013). *BeiDou China's Rapidly Emerging GNSS*. Obtido de Inside GNSS: <http://www.insidegnss.com/node/3590>

- Los Angeles Air force Base. (21 de Novembro de 2007). *SMC Announces Contract Award for Next Generation GPS Control Segment*. Obtido de Los Angeles Air force Base: <http://www.losangeles.af.mil/news/story.asp?id=123076912>
- Los Angeles Air Force Base. (6 de Março de 2014a). *Global Positioning System (GPS) IIR/IIR-M Satellite*. Obtido de Los Angeles Air Force Base: <http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=18671>
- Los Angeles Air Force Base. (6 de Março de 2014b). *Global Positioning System (GPS) IIF Satellite*. Obtido de Los Angeles Air Force Base: <http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=18670>
- Los Angeles Air Force Base. (6 de Março de 2014c). *Global Positioning System (GPS) III Satellite*. Obtido de Los Angeles Air Force Base: <http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=18830>
- Lu, M. (2011). Simulation and Measurements on BeiDou-2 Positioning Performance. *Stanford PNT Symposium 2011*. Pequim: Universidade de Tsinghua.
- Lu, M., & Yao, Z. (2014). New Signal Structures for BeiDou Navigation Satellite System. *Stanford's PNT Symposium 2014*. Pequim: Universidade de Tsinghua.
- Lyskov, D., & Head, D. (2013). GLONASS Policy, Status and Evolution. *8th Meeting of the International Committee on Global*. Dubai: Russian Federal Space Agency.
- Mai, T. (27 de Outubro de 2012). *International*. Obtido de National Aeronautics and Space Administration: http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/overview/Text_Speakersbureau.html
- Majithiya, P., Khatri, K., & Hota, J. K. (2011). *Indian Regional Navigation Satellite System: Correction Parameters for Timing Group Delays*. Indian Space Research Organization.
- Marreiros, J. P. (1989). *Performance Analysis of GPS Attitude: Determination in a Hydrographic Survey Launch*. New Brunswick: Universidade de New Brunswick.
- Marreiros, J. P. (2012). *Kinematic GNSS Precise Point Positioning: Application to marine platforms*. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- McDonald, K. D. (2002). The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo. *Journal of Global Positioning Systems*(1).
- Military Topographic Department of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation. (2014). *"Parametry Zemli 1990" (PZ-90.11): Reference document*. Moscow.
- Misra, P., & Enge, P. (2011). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Lincoln: Ganga-Jamuna Press.

- Monico, J. F. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: UNESP.
- Nagle, T. J. (2009). *GPS Civil Monitoring Performance Specification*. El Segundo.
- NASA Earth Observatory. (s.d.). *Three Classes of Orbit*. Obtido de NASA Earth Observatory: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>
- National Academy of Engineering. (2012). *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. Washington: National Academies Press.
- National Bureau of Surveying and Geo-information. (2012). *China Terrestrial Reference Frame 2000*.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (17 de Fevereiro de 2012). *Data From the First Week Without Selective Availability*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (24 de Setembro de 2013a). *Selective Availability*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (21 de Outubro de 2013b). *United States Policy*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/policy/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (2014 de Julho de 2014). *GPS Modernization*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (2 de Fevereiro de 2015a). *New Civil Signals*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (27 de Março de 2015b). *Control Segment*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (24 de Junho de 2015c). *International Cooperation*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/policy/cooperation/>

- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing. (16 de Julho de 2015d). *Space Segment*. Obtido de Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- National Geospatial-Intelligence Agency. (2014). *World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Fort Belvoir: National Geospatial-Intelligence Agency.
- Neelakantan, N. (2010). *Overview of Indian Satellite Navigation Programme*. India: Indian Space Research Organization.
- NIS GLONASS. (s.d.). *ERA-GLONASS*. Obtido de NIS GLONASS: http://www.nis-ghlonass.ru/en/project/era_ghlonass/index.php
- NovAtel. (2003). *GPS Position Accuracy Measures*. Calgary: NovAtel.
- NovAtel. (2013). *Understanding the Difference Between Anti-Spoofing and Anti-Jamming*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/technology-in-action/velocity/velocity-2013/understanding-the-difference-between-anti-spoofing-and-anti-jamming/>
- NovAtel. (s.d.). *Galileo*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/galileo/>
- NovAtel. (s.d.). *GLONASS*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/ghlonass/>
- NovAtel. (s.d.). *GPS*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/gps/>
- NovAtel. (s.d.). *NovAtelChartH*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/assets/Documents/Downloads/NovAtelChartH.pdf>
- NovAtel. (s.d.). *Other Systems*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/other-systems/>
- NovAtel. (s.d.). *Step 2- Propagation*. Obtido de NovAtel: <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-2-basic-gnss-concepts/step-2-propagation/>
- Oehler, V., Krueger, J. M., Beck, T., Kirchner, M., Trautenberg, H. L., Hahn, J., & Blonski, D. (2009). *Galileo System Performance Status Report. 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*. Savannah.
- Office of the Press Secretary. (18 de Setembro de 2007). *Statement by the Press Secretary*. Obtido de The White House: <http://georgewbush-whitehouse.archives.gov/news/releases/2007/09/20070918-2.html>

- Official Journal of the European Communities. (1999). Council Resolution of 19 July 1999 on the involvement of Europe in a new generation of satellite navigation services -Galileo Council Resolution of 19 July 1999 on the involvement of. *Official Journal of the European Communities*.
- Oleynik, E. (2012). GLONASS Status and Modernization. *United Nations/Latvia Workshop of GNSS*. Riga: Russian Federal Space Agency.
- Pace, S. (2012). The Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS) Spectrum Use. *Spectrum Management 2012 National Spectrum Management Association*. Washington: Universidade de George Washington .
- Parkinson, B. W., & Spilker, J. J. (1996). *Global Positioning System: Theory & Applications Volume I*. EUA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Pereira, R. (9 de Fevereiro de 2011). *Generic Receiver Architecture*. Obtido de NAVIPEDIA:
http://www.navipedia.net/index.php/File:Generic_Receiver_Architecture.PNG
- Petovello, M. G., O'Driscoll, C., Lachapelle, G., Borio, D., & Murtaza, H. (2008). Architecture and Benefits of an Advanced GNSS Software Receiver. *Journal of Global Positioning Systems*(7).
- Petrovski, I. G. (2014). *GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou for Mobile Devices*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Pike, J. (11 de Novembro de 1997). *Cruise Missile Support Activity (CMSA)*. Obtido de Federation of American Scientists:
<http://fas.org/irp/agency/dod/usjfc/cmsa/index.html>
- Pisacane, V. L. (1998). The Legacy of Transit: A Dedication. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 19.
- Proc, J. (Novembro de 2014). *Hyperbolic Radionavigation Systems* . Obtido de Jerry Proc's Group: <http://jproc.ca/hyperbolic/>
- Qianjun, M. (9 de Setembro de 2013). *BeiDou Maturing Rapidly*. Obtido de GIM International: <http://www.gim-international.com/content/article/beidou-maturing-rapidly>
- QZSS Project Team Office of Space Applications JAXA. (2006). *Quasi-Zenith Satellite System*. Obtido de Japan Aerospace Exploration Agency: http://qzss.jaxa.jp/index_e.html
- QZSS Project Team Office of Space Applications JAXA . (s.d.). *Service of QZSS*. Obtido de Japan Aerospace Exploration Agency: http://qzss.jaxa.jp/01_e.html
- Radio Technical Commission for Aeronautics. (2006). *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*. Radio Technical Commission for Aeronautics.

- Ribeiro, J. M. (2007). Métodos de Investigação. *Mestrado em Reabilitação da Arquitectura e Núcleos Urbanos*. Lisboa. Obtido de <http://mestrado-reabilitacao.fa.utl.pt/disciplinas/jribeiro/jribeiro.pdf>
- Rietdorf, A., Daub, C., & Loef, P. (2006). Precise Positioning in Real-Time using Navigation Satellites and Telecommunication. *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*. Hannover.
- Roßbach, U. (2000). *Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS*. Neubiberg.
- Russian Federation. (2003). *State Radio Frequency Service General Radio Frequency Centre*. Moscow: Federal State Unitary Enterprise.
- Russian Insider. (24 de Fevereiro de 2015). *Russia May Place Stations for GPS Alternative in China, Cuba, Nicaragua, Vietnam*. Obtido de Russian Insider: <http://www.sfu-kras.ru/en/15458>
- Russian Institute of Space Device Engineering. (2008). *Interface Control Document*. Moscow.
- Russian Space. (13 de Janeiro de 2015a). *Deployment of the GLONASS constellation*. Obtido de Russian Space: http://www.russianspaceweb.com/glonass_deployment.html
- Russian Space. (17 de Junho de 2015b). *GLONASS spacecraft (11F654)*. Obtido de Russian Space: <http://www.russianspaceweb.com/uragan.html>
- Russian Space. (17 de Julho de 2015c). *GLONASS-M (14F113)*. Obtido de Russian Space: <http://www.russianspaceweb.com/uragan.html>
- Russian Space. (17 de Junho de 2015d). *GLONASS-KM*. Obtido de Russian Space: <http://www.russianspaceweb.com/uragan.html>
- Russian Space News. (28 de Abril de 2014). *Proton-M Launched from Baikonur with 2 Communication Satellites*. Obtido de Russian Space News: <http://russianspacenews.com/proton-m-launched-from-baikonur-with-2-communication-satellites/>
- Russian Space Systems. (2015a). *GLONASS*. Obtido de Russian Space Systems: <http://www.spacecorp.ru/en/directions/glonass/>
- Russian Space Systems. (2015b). *System Purpose*. Obtido de Russian Space Systems: <http://www.spacecorp.ru/en/directions/glonass/function/>
- Russian System of Differential Correction and Monitoring. (16 de Julho de 2015). *Precision of GLONASS/GPS navigation definitions*. Obtido de Russian System of Differential Correction and Monitoring: <http://www.sdcn.ru/smglo/stparam?version=eng&redate&site=extern>

- Samana, N. (2008). *Global Positioning: Technologies and Performance*. New Jersey: Wiley.
- Saulay, J.-P. (2010). Overview of NATO Navigation Sub-committee and its PNT and NAVWAR Activities. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*. Portland: Oregon Convention Center.
- Sayeenathan, S. (2013). Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) And GPS-Aided Geo Augmented Navigation System (GAGAN). *8th Meeting of the International Committee on Global*. Dubai: Indian Space Research Organization.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Hannover: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Siu, J. (2012). Global Navigation Satellite System Overview and Support for PBN Implementation. *ICAO Workshop on PBN Airspace Redesign and GNSS Implementation supporting PBN*. Montreal: International Civil Aviation Organization.
- Smitham, M. (2014). Global Positioning Systems Directorate. *GPS Program Update to ION GNSS+ 2014*. California: Space and Missile Systems Center.
- Someswar, D. G., Rao, T. P., & Chigurukota, D. R. (2013). Global Navigation Satellite Systems and Their Applications. *International Journal of Software and Web Sciences*.
- Sousa, M. J., & Baptista, C. S. (2011). *Como fazer investigação, dissertações, teses e relatórios segundo Bolonha*. Lisboa: Pactor.
- Sprinkler, J. J. (1996). Tropospheric effects on GPS. *Global Positioning System: Theory and Applications, I*.
- Sputnik News. (18 de Maio de 2007). *Putin makes Glonass navigation system free for customers - I*. Obtido de Sputnik News: <http://sputniknews.com/science/20070518/65725503.html>
- Sputnik News. (12 de Julho de 2015). *Russia's GLONASS Proves More Than a Match for America's GPS*. Obtido de Sputnik News: Differential Correction and
- Stansell, T. A. (1978). *Status, Theory, Performance and Applications*. Magnavox Government and Industrial Electronics Company.
- Stupak, G. (2013). SDCM present status and future & GLONASS signals development. *8th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems*. Dubai: Russian Federal Space Agency.
- Subirana, J. S., Zornoza, J. M., & Hernández Pajares, M. (2013). *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms*. Leiden: ESA Communications.

- Sunda, S. (2012). Ionospheric data collection and analysis over Indian region- Recent results. *1st Meeting of ionospheric Studies Task Force*. Republic of Korea: Airports Authority of India.
- Thuy, M. (16 de Julho de 2015). *Global Positioning System History*. Obtido de National Aeronautics and Space Administration: http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html
- Tolman, B., Harris, R. B., Gaussiran, T., Munton, D., Little, J., Mach, R., . . . Schlossberg, D. (2004). The GPS Toolkit - Open Source GPS Software. *17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Long Beach.
- Toran-Marti, F., & Ventura-Traveset, J. (2004). *The ESA EGNOS Project: The First Step of the European Contribution to the Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Toulouse.
- Tyson, M., & Kopp, C. (Novembro de 2007). Lightweight GNSS Support Protocol for Military and Civil Applications.
- U.S. Air Force. (2006). *GPS Modernization Fact Sheet*. Washington. Obtido de U.S. Air Force.
- U.S. Air Force. (15 de Setembro de 2010). *Global Positioning System*. Obtido de U.S. Air Force: <http://www.af.mil/AboutUs/FactSheets/Display/tabid/224/Article/104610/global-positioning-system.aspx>
- U.S. Coast Guard Navigation Center. (17 de Julho de 1995). *GPS fully operational statement of 1995*. Obtido de U.S. Coast Guard Navigation Center: <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=global>
- U.S. Coast Guard Navigation Center. (19 de Junho de 2014). *General information on GPS*. Obtido de U.S. Coast Guard Navigation Center: <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=GPSmain>
- U.S. Government, FAA & GNSS Program Office. (2008). *Phase I of the GNSS Evolutionary Architecture Study*. Washington: Federal Aviation Administration.
- U.S. Government, FAA & GNSS Program Office. (2010). *Phase II of the GNSS Evolutionary Architecture Study*. Washington: Federal Aviation Administration.
- U.S. Navy (Realizador). (1967). *Transit Satellites for Navigation: "The Navy Navigation Satellite System"* [Filme].
- United Nations. (2004). Report of the Action Team on Global Navigation Satellite Systems (GNSS). *3th United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space*. Viena: United Nations.

- United Nations. (2010). Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentations Systems. *International Committee on GNSS Systems Provider's Forum*. New York: United Nations.
- United Nations. (2012). *Global Navigation Satellite System: Education Curriculum*. New York: United Nations.
- United States Naval Observatory. (12 de Abril de 1996). *Block I Satellite Information*. Obtido de United States Naval Observatory: <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb1.txt>
- United States Naval Observatory. (30 de Abril de 2015). *Block II Satellite Information*. Obtido de United States Naval Observatory: <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt>
- Urlichich, Y., Subbotin, V., Stupak, G., Dvorkin, V., Povalyaev, A., Karutin, S., & Bakitko, R. (1 de Novembro de 2011). *GLONASS Modernization*. Obtido de GPS World: <http://gpsworld.com/glonass-modernization-12232/>
- Ventura-Traveset, J., & Flament, D. (Dezembro de 2006). *The European Geostationary Navigation Overlay System – A cornerstone of Galileo*. Noordwijk: European Space Agency.
- Ventura-Traveset, J., Basker, S., & Ashton, K. (2000). *EGNOS GEO Replenishment: Planning for the Future*.
- Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E., Lachapelle, G., . . . Vaniček, P. (1986). *Guide to GPS Positioning*. New Brunswick: University of New Brunswick Graphic Services.
- Wong, A. (2009). Worldwide GNSS Interoperability. *Civil Global Positioning System Service Interface Committee*. Washington: Office of Space and Advanced Technology Bureau of Oceans, Environment and Science.
- Wu, S., Peck, S., Schempp, T., Shloss, P., Wan, H., Buckner, P., . . . Angus, J. (2006). A Single Frequency Approach to Mitigation of Ionospheric Depletion Events for SBAS in Equatorial Regions. *19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*. Texas.
- Xinhua. (23 de Abril de 2015). *China's satellite navigation system to expand coverage globally by 2020*. Obtido de China Daily: http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-04/23/content_20518647.htm
- Xu, G. (2007). *GPS Theory, algorithms and applications* (2ª ed.). Potsdam: Springer.
- Xu, Y., Ji, S., Chen, W., & Weng, D. (2013). The Comparison on the Positioning Performance Between BeiDou and GPS. *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*.

Zourek, M. H. (2010). *European GNSS Open Service Signal In Space Interface Control Document*. Brussels: European Union.

Anexo A. Satélites de navegação enviados para a órbita

A.1. Sistema GPS

Até 31 de julho de 2015, o sistema GPS enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.e*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
Block I	11	0	0	10	1
Block II	9	0	0	9	0
Block IIA	19	2	0	17	0
Block IIR	13	12	0	0	1
Block IIRM	8	7	1	0	0
Block IIF	10	9	1	0	0
Total	70	30	2	36	2

Tabela A.1 – Situação atual dos satélites GPS.

Local de lançamento	Designação
Va SLC-3E	Vandenberg Air Force Base Space Launch Complex 3 East
Va SLC-3W	Vandenberg Air Force Base Space Launch Complex 3 West
CC LC-17A	Cape Canaveral Air Force Station Launch Complex 17 Pad A
CC LC-17B	Cape Canaveral Air Force Station Launch Complex 17 Pad B
CC SLC-17A	Cape Canaveral Air Force Station Space Launch Complex 17 Pad A
CC SLC-17B	Cape Canaveral Air Force Station Space Launch Complex 17 Pad B
CC SLC-37B	Cape Canaveral Air Force Station Space Launch Complex 37 Pad B
CC SLC-41	Cape Canaveral Air Force Station Space Launch Complex 41

Tabela A.2 – Locais de lançamento satélites GPS.

A.1.1. *Block I*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS 1	22-02-1978	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	4	MEO	Retirado Julho 1985
GPS 2	13-05-1978	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	7		Retirado Fevereiro 1988
GPS 3	07-10-1978	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	6		Retirado Maio 1992
GPS 4	11-12-1978	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	8		Retirado Outubro 1989
GPS 5	09-02-1980	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	5		Retirado Maio 1984
GPS 6	26-04-1980	Atlas-F SGS-1	Va SLC-3E	9		Retirado Março 1991
GPS 7	19-12-1981	Atlas-E SGS-1	Va SLC-3E	-		Falhou órbita
GPS 8	14-07-1983	Atlas-E SGS-2	Va SLC-3W	11		Retirado Maio 1993
GPS 9	13-06-1984	Atlas-E SGS-2	Va SLC-3W	13		Retirado Fevereiro 1994
GPS 10	08-09-1984	Atlas-E SGS-2	Va SLC-3W	12		Retirado Novembro 1995
GPS 11	09-10-1985	Atlas-E SGS-2	Va SLC-3W	3		Retirado Abril 1994

Tabela A.3 – Satélites *Block I* GPS.

A.1.2. *Block II*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS-2 1	14-02-1989	Delta-6925	CC LC-17A	14	MEO	Retirado março 2000
GPS-2 2	10-06-1989	Delta-6925	CC LC-17A	2		Retirado fevereiro 2004
GPS-2 3	18-08-1989	Delta-6925	CC LC-17A	16		Retirado outubro 2000
GPS-2 4	21-10-1989	Delta-6925	CC LC-17A	19		Retirado março 2001
GPS-2 5	11-12-1989	Delta-6925	CC LC-17B	17		Retirado fevereiro 2005
GPS-2 6	24-01-1990	Delta-6925	CC LC-17A	18		Retirado agosto 2000
GPS-2 7	26-03-1990	Delta-6925	CC LC-17A	20		Retirado maio 1996
GPS-2 8	02-08-1990	Delta-6925	CC LC-17A	21		Retirado setembro 2002
GPS-2 9	01-10-1990	Delta-6925	CC LC-17A	15		Retirado novembro 2006

Tabela A.4 – Satélites *Block II* GPS.

A.1.3. *Block IIA*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS-2A 1	26-11-1990	Delta-7925	CC LC-17A	23/32	MEO	Operacional
GPS-2A 2	04-07-1991	Delta-7925	CC LC-17A	24		Retirado setembro 2011
GPS-2A 3	23-02-1992	Delta-7925	CC LC-17B	25		Retirado dezembro 2009
GPS-2A 4	10-04-1992	Delta-7925	CC LC-17B	28		Retirado novembro 1996
GPS-2A 5	07-07-1992	Delta-7925	CC LC-17B	26		Retirado janeiro 2015
GPS-2A 6	09-09-1992	Delta-7925	CC LC-17A	27		Retirado agosto 2011
GPS-2A 7	22-11-1992	Delta-7925	CC LC-17A	31/ 1/ 30/ N.A.		Retirado março 2008
GPS-2A 8	18-12-1992	Delta-7925	CC LC-17B	29		Retirado outubro 2007
GPS-2A 9	03-02-1993	Delta-7925	CC LC-17A	22		Retirado dezembro 2002
GPS-2A 10	30-03-1993	Delta-7925	CC LC-17A	31		Retirado outubro 2005
GPS-2A 11	13-05-1993	Delta-7925	CC LC-17A	7/ 1/ 24		Retirado dezembro 2007
GPS-2A 12	26-06-1993	Delta-7925	CC LC-17A	9		Retirado maio 2014
GPS-2A 13	30-08-1993	Delta-7925	CC LC-17B	5/ 30		Retirado março 2013
GPS-2A 14	26-10-1993	Delta-7925	CC LC-17B	4		Operacional
GPS-2A 15	10-03-1994	Delta-7925	CC LC-17A	6		Retirado fevereiro 2014
GPS-2A 16	27-03-1996	Delta-7925	CC LC-17B	3		Retirado agosto 2014
GPS-2A 17	16-07-1996	Delta-7925	CC LC-17A	10		Retirado julho 2015
GPS-2A 18	12-09-1996	Delta-7925	CC LC-17A	30		Retirado julho 2011
GPS-2A 19	06-11-1997	Delta-7925	CC LC-17A	8		Retirado outubro 2014

Tabela A.5 – Satélites *Block IIA* GPS.

A.1.4. *Block IIR*

Satélite	Data Lançamento	Veículo de Lançamento	Local de Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS-2R 1	16-01-1997	Delta-7925	CC LC-17A	12	MEO	Falhou órbita
GPS-2R 2	23-07-1997	Delta-7925	CC LC-17A	13		Operacional
GPS-2R 3	07-10-1999	Delta-7925	CC SLC-17A	11		Operacional
GPS-2R 4	11-05-2000	Delta-7925	CC SLC-17A	20		Operacional
GPS-2R 5	16-07-2000	Delta-7925	CC SLC-17A	28		Operacional
GPS-2R 6	10-11-2000	Delta-7925	CC SLC-17A	14		Operacional
GPS-2R 7	30-01-2001	Delta-7925	CC SLC-17A	18		Operacional
GPS-2R 8	29-01-2003	Delta-7925	CC SLC-17B	16		Operacional
GPS-2R 9	31-03-2003	Delta-7925	CC SLC-17A	21		Operacional
GPS-2R 10	21-12-2003	Delta-7925	CC SLC-17A	22		Operacional
GPS-2R 11	20-03-2004	Delta-7925	CC SLC-17B	19		Operacional
GPS-2R 12	23-06-2004	Delta-7925	CC SLC-17B	23		Operacional
GPS-2R 13	06-11-2004	Delta-7925	CC SLC-17B	2		Operacional

Tabela A.6 – Satélites *Block IIR* GPS.

A.1.5. *Block IIR-M*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS-2RM 1	26-09-2005	Delta-7925	CC SLC-17A	17	MEO	Operacional
GPS-2RM 2	25-09-2006	Delta-7925	CC SLC-17A	31		Operacional
GPS-2RM 3	17-11-2006	Delta-7925	CC SLC-17A	12		Operacional
GPS-2RM 4	17-10-2007	Delta-7925	CC SLC-17A	15		Operacional
GPS-2RM 5	20-12-2007	Delta-7925	CC SLC-17A	29		Operacional
GPS-2RM 6	15-03-2008	Delta-7925	CC SLC-17A	7		Operacional
GPS-2RM 7	24-03-2009	Delta-7925	CC SLC-17A	1/ 27/ 30/ 6/ N.A.		Reserva
GPS-2RM 8	17-08-2009	Delta-7925	CC SLC-17A	5		Operacional

Tabela A.7 – Satélites *Block IIR-M* GPS.

A.1.6. *Block IIF*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GPS-2F 1	28-05-2010	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	25	MEO	Operacional
GPS-2F 2	16-07-2011	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	1		Operacional
GPS-2F 3	04-10-2012	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	24		Operacional
GPS-2F 4	15-05-2013	Atlas-5(401)	CC SLC-41	27		Operacional
GPS-2F 5	21-02-2014	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	30		Operacional
GPS-2F 6	17-05-2014	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	6		Operacional
GPS-2F 7	02-08-2014	Atlas-5(401)	CC SLC-41	9		Operacional
GPS-2F 8	29-10-2014	Atlas-5(401)	CC SLC-41	3		Operacional
GPS-2F 9	25-03-2015	Delta-4M+(4,2)	CC SLC-37B	26		Operacional
GPS-2F 10	15-07-2015	Atlas-5(401)	CC SLC-41	8		Testes

Tabela A.8 – Satélites *Block IIF* GPS.

Nota: Alguns satélites apresentam/apresentaram mais de um PRN, número pelo qual são identificados, devido a estes terem deixado de estar operacionais ou terem tido problemas a nível da arquitetura, o que leva estes, após serem recolocados na órbita ou terem sido considerados aptos novamente, a terem novo PRN.

A.2. Sistema GLONASS

Até 31 de julho de 2015, o sistema GLONASS enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.f*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
Uragan Block I	10	0	0	10	0
Uragan Block IIa	9	0	0	9	0
Uragan Block IIb	12	0	0	6	6
Uragan Block IIv	56	0	0	56	0
Uragan-M	43	24	2	11	6
Uragan-K1	2	0	2	0	0
Total	132	24	4	92	12

Tabela A.9 – Situação atual dos satélites GLONASS.

Local de lançamento	Designação
Ba LC 200/39	Baikonur Cosmodrome Launch Complex Site 200 Area 39
Ba LC 200/40	Baikonur Cosmodrome Launch Complex Site 200 Area 40
Ba LC 81/23	Baikonur Cosmodrome Launch Complex Site 81 Area 23
Ba LC 81/24	Baikonur Cosmodrome Launch Complex Site 81 Area 24
PILC-43/4	Plesetsk Cosmodrome Launch Complex Site 43 Area 4

Tabela A.10 – Locais de lançamento satélites GLONASS.

A.2.1. *Uragan Block I*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 1413	12-10-1982	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1	MEO	Retirado janeiro 1984
Kosmos 1490	10-08-1983	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	3		Retirado julho 1984
Kosmos 1491	10-08-1983	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	2		Retirado setembro 1984
Kosmos 1519	29-12-1983	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	18		Retirado setembro 1984
Kosmos 1520	29-12-1983	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	17		Retirado junho 1986
Kosmos 1554	19-05-1984	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	19		Retirado agosto 1985
Kosmos 1555	19-05-1984	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	18		Retirado outubro 1985
Kosmos 1593	04-09-1984	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	2		Retirado novembro 1985
Kosmos 1594	04-09-1984	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	3		Retirado setembro 1986
Kosmos 1650	17-05-1985	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1		Retirado novembro 1985

Tabela A.11 – Satélites *Uragan Block I* GLONASS.

A.2.2. *Uragan Block IIa*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 1651	17-05-1985	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1	MEO	Retirado agosto 1987
Kosmos 1710	24-12-198	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	18		Retirado fevereiro 1987
Kosmos 1711	24-12-1985	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	17		Retirado maio 1987
Kosmos 1778	16-09-1986	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	2		Retirado fevereiro 1987
Kosmos 1779	16-09-1986	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	3		Retirado julho 1988
Kosmos 1780	16-09-1986	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	8		Retirado junho 1988
Kosmos 1987	10-01-1989	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	2		Retirado março 1993
Kosmos 2022	31-05-1989	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	24		Retirado janeiro 1990
Kosmos 2023	31-05-1989	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	19		Retirado novembro 1989

Tabela A.12 – Satélites *Uragan Block I* GLONASS.

A.2.3. *Uragan Block IIb*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 1838	24-04-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	-	MEO	Falhou órbita
Kosmos 1839	24-04-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	-		Falhou órbita
Kosmos 1840	24-04-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	-		Falhou órbita
Kosmos 1883	16-09-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	-		Retirado junho 1989
Kosmos 1884	16-09-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	-		Retirado agosto 1988
Kosmos 1885	16-09-1987	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	17		Retirado fevereiro 1989
Kosmos 1917	17-02-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	-		Falhou órbita
Kosmos 1918	17-02-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	-		Falhou órbita
Kosmos 1919	17-02-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	-		Falhou órbita
Kosmos 1946	21-05-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	7		Retirado maio 1990
Kosmos 1947	21-05-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	8		Retirado março 1991
Kosmos 1948	21-05-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1		Retirado junho 1991

Tabela A.13 – Satélites *Uragan Block IIb* GLONASS.

A.2.4. *Uragan Block IIv*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 1970	16-09-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	17	MEO	Retirado maio 1990
Kosmos 1971	16-09-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	18		Retirado agosto 1989
Kosmos 1972	16-09-1988	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	19		Retirado novembro 1991
Kosmos 1988	10-01-1989	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	3		Retirado fevereiro 1992
Kosmos 2079	19-05-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	17		Retirado abril 1994
Kosmos 2080	19-05-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	19		Retirado julho 1994
Kosmos 2081	19-05-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	20		Retirado agosto 1992
Kosmos 2109	08-12-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	7		Retirado março 1994
Kosmos 2110	08-12-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	4		Retirado outubro 1993
Kosmos 2111	08-12-1990	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/40	5		Retirado junho 1996
Kosmos 2139	04-04-1991	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	22		Retirado setembro 1994
Kosmos 2140	04-04-1991	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	21		Retirado janeiro 1992
Kosmos 2141	04-04-1991	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	24		Retirado fevereiro 1992
Kosmos 2177	29-01-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	3		Retirado janeiro 1993
Kosmos 2178	29-01-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	8		Retirado maio 1997
Kosmos 2179	29-01-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	1		Retirado outubro 1996
Kosmos 2204	30-07-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	18		Retirado junho 1997
Kosmos 2205	30-07-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	21		Retirado junho 1994
Kosmos 2206	30-07-1992	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	24		Retirado maio 1996
Kosmos 2234	17-02-1993	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	2		Retirado março 1994
Kosmos 2235	17-02-1993	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	6		Retirado junho 1997
Kosmos 2236	17-02-1993	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	3		Retirado julho 1997

Kosmos 2275	11-04-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	18	MEO	Retirado março 1999
Kosmos 2276	11-04-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	17		Retirado julho 1999
Kosmos 2277	11-04-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	23		Retirado julho 1997
Kosmos 2287	11-08-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	12		Retirado novembro 1998
Kosmos 2288	11-08-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	14		Retirado agosto 1999
Kosmos 2289	11-08-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/23	16		Retirado agosto 2000
Kosmos 2294	20-11-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	4		Retirado setembro 1999
Kosmos 2295	20-11-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	3		Retirado julho 1999
Kosmos 2296	20-11-1994	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	6		Retirado outubro 1999
Kosmos 2307	07-03-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	20		Retirado setembro 1999
Kosmos 2308	07-03-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	22		Retirado novembro 2000
Kosmos 2309	07-03-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	19		Retirado julho 1997
Kosmos 2316	24-07-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	15		Retirado dezembro 1998
Kosmos 2317	24-07-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	10		Retirado janeiro 2001
Kosmos 2318	24-07-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	11		Retirado fevereiro 2001
Kosmos 2323	14-12-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	9		Retirado agosto 2000
Kosmos 2324	14-12-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	15		Retirado janeiro 2001
Kosmos 2325	14-12-1995	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	13		Retirado julho 2001
Kosmos 2362	30-12-1998	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	7		Retirado outubro 2003
Kosmos 2363	30-12-1998	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	8		Retirado dezembro 2003
Kosmos 2364	30-12-1998	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1		Retirado julho 2002
Kosmos 2374	13-10-2000	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	18		Retirado novembro 2007
Kosmos 2375	13-10-2000	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	17		Retirado abril 2007
Kosmos 2376	13-10-2000	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	24		Retirado março 2006
Kosmos 2380	01-12-2001	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	6		Retirado dezembro 2003
Kosmos 2381	01-12-2001	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	3		Retirado janeiro 2008
Kosmos 2394	25-12-2002	Proton-K Blok-DM-2M	Ba LC 81/23	22		Retirado novembro 2007
Kosmos 2395	25-12-2002	Proton-K Blok-DM-2M	Ba LC 81/23	21		Retirado janeiro 2008
Kosmos 2396	25-12-2002	Proton-K Blok-DM-2M	Ba LC 81/23	23		Retirado abril 2007
Kosmos 2402	10-12-2003	Proton-K Briz-M	Ba LC 81/24	2		Retirado abril 2007
Kosmos 2403	10-12-2003	Proton-K Briz-M	Ba LC 81/24	4		Retirado abril 2009
Kosmos 2411	26-12-2004	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	1		Retirado outubro 2008
Kosmos 2412	26-12-2004	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	8		Retirado outubro 2008
Kosmos 2417	25-12-2005	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	22		Retirado janeiro 2008

Tabela A.14 – Satélites *Uragan Block IIv* GLONASS.

A.2.5. *Uragan M*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 2382	01-12-2001	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	5	MEO	Retirado janeiro 2008
Kosmos 2404	10-12-2003	Proton-K Briz-M	Ba LC 81/24	6		Retirado junho 2009
Kosmos 2413	26-12-2004	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	8		Retirado novembro 2012
Kosmos 2418	25-12-2005	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	24		Retirado fevereiro 2010
Kosmos 2419	25-12-2005	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 200/39	17		Operacional
Kosmos 2424	25-12-2006	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	14		Operacional
Kosmos 2425	25-12-2006	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	15		Operacional
Kosmos 2426	25-12-2006	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	10		Operacional
Kosmos 2431	26-10-2007	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	17		Retirado outubro 2011
Kosmos 2432	26-10-2007	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	20		Operacional
Kosmos 2433	26-10-2007	Proton-K Blok-DM-2	Ba LC 81/24	19		Operacional
Kosmos 2434	25-12-2007	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	13		Operacional
Kosmos 2435	25-12-2007	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	14		Retirado outubro 2011
Kosmos 2436	25-12-2007	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	11		Operacional
Kosmos 2442	25-09-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	18		Retirado fevereiro 2014
Kosmos 2443	25-09-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	21		Manutenção
Kosmos 2444	25-09-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	22		Retirado novembro 2012
Kosmos 2447	25-12-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	3		Retirado novembro 2012
Kosmos 2448	25-12-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	2		Retirado outubro 2013
Kosmos 2449	25-12-2008	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	8		Retirado setembro 2012
Kosmos 2456	14-12-2009	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	1		Operacional
Kosmos 2457	14-12-2009	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	6		Operacional
Kosmos 2458	14-12-2009	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	5		Operacional
Kosmos 2459	01-03-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	22		Operacional
Kosmos 2460	01-03-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	23		Operacional
Kosmos 2461	01-03-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	24		Operacional
Kosmos 2464	02-09-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	9		Operacional
Kosmos 2465	02-09-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	12		Operacional
Kosmos 2466	02-09-2010	Proton-M Blok-DM-2	Ba LC 81/24	16		Operacional
Kosmos 2470	05-12-2010	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-		Falhou órbita
Kosmos 2471	05-12-2010	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-		Falhou órbita
Kosmos 2472	05-12-2010	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-		Falhou órbita
Kosmos 2474	02-10-2011	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	4		Operacional
Kosmos 2475	04-11-2011	Proton-M Briz-M	Ba LC 81/24	8		Operacional
Kosmos 2476	04-11-2011	Proton-M Briz-M	Ba LC 81/24	3		Operacional
Kosmos 2477	04-11-2011	Proton-M Briz-M	Ba LC 81/24	7		Operacional
Kosmos 2478	28-11-2011	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	17		Manutenção
Kosmos 2485	26-04-2013	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	2		Operacional

Kosmos 2488	02-07-2013	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-	MEO	Falhou órbita
Kosmos 2489	02-07-2013	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-		Falhou órbita
Kosmos 2490	02-07-2013	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	-		Falhou órbita
Kosmos 2491	23-03-2014	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	18		Operacional
Kosmos 2500	14-06-2014	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	21		Operacional

Tabela A.15 – Satélites *Uragan M* GLONASS.

A.2.6. *Uragan K1*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	Slot	Tipo Órbita	Estado
Kosmos 2471	26-02-2011	Proton-M Blok-DM-3	Ba LC 81/24	20	MEO	Testes
Kosmos 2501	30-11-2014	Soyuz-2-1b Fregat-M	PILC-43/4	9		Testes

Tabela A.16 – Satélites *Uragan K1* GLONASS.

Nota: Os satélites GLONASS são identificados por um valor equivalente a 64 mais o valor do *Slot Number*. Isto deve aos satélites utilizarem a técnica de transmissão FDMA, ao contrário dos restantes sistemas, levando a que não possuam um valor de PRN.

A.3. Sistema Galileo

Até 31 de julho de 2015, o sistema Galileo enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.b*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
Giove-A	1	0	0	1	0
Giove-B	1	0	0	1	0
Galileo-IOV	4	3	1	0	0
Galileo-FOC	4	0	4	0	0
Total	10	3	5	2	0

Tabela A.17 – Situação atual dos satélites Galileo.

Local de lançamento	Designação
Ba LC-31/6	Baikunur Cosmodrome Launch Complex Site 31 Area 6
Ko ELS	Guiana Space Centre Ensemble de Lancement Soyouz

Tabela A.18 – Locais de lançamento satélites Galileo.

A.3.1. *Giove*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Giove A	28-12-2005	Soyuz-FG Fregat	Ba LC-31/6	-	MEO	Retirado julho 2012
Giove B	26-04-2008	Soyuz-FG Fregat	Ba LC-31/6	-		Retirado julho 2012

Tabela A.19 – Satélites *Giove* Galileo.

A.3.2. *Galileo IOV*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Galileo 1 PFM	21-10-2011	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E11	MEO	Operacional
Galileo 2 FM2	21-10-2011	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E12		Operacional
Galileo 3 FM3	12-10-2012	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E19		Operacional
Galileo 4 FM4	12-10-2012	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E20		Manutenção

Tabela A.20 – Satélites *Galileo IOV* Galileo.

A.3.3. *Galileo FOC*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Galileo 5 FM1	22-08-2014	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E18	MEO	Em preparação
Galileo 6 FM2	22-08-2014	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E14		Em preparação
Galileo 7 FM3	27-03-2015	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E26		Em preparação
Galileo 8 FM4	27-03-2015	Soyuz-STB Fregat-MT	Ko ELS	E22		Em preparação

Tabela A.21 – Satélites *Galileo FOC* Galileo.

A.4. Sistema BeiDou

Até 31 de julho de 2015, o sistema BeiDou enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.a*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
Beidou-1	4	0	0	4	0
Beidou-2 G	6	5	0	1	0
Beidou-2 I	5	5	0	0	0
Beidou-2 M	5	4	1	0	0
BeiDou-3 I	1	0	1	0	0
BeiDou-3 M	2	0	2	0	0
Total	23	14	4	5	0

Tabela A.22 – Situação atual dos satélites BeiDou.

Local de lançamento	Designação
Xi LC-2	Xichang Satellite Launch Center 2
Xi LC-3	Xichang Satellite Launch Center 3

Tabela A.23 – Locais de lançamento satélites BeiDou.

A.4.1. *BeiDou-1*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
BeiDou-1 A	30-10-2000	CZ-3A	Xi LC-2	N.A.	GEO	Retirado dezembro 2011
BeiDou-1 B	20-12-2000	CZ-3A	Xi LC-2	N.A.		Retirado dezembro 2011
BeiDou-1 C	24-05-2003	CZ-3A	Xi LC-2	N.A.		Retirado dezembro 2012
BeiDou-1 D	02-02-2007	CZ-3A	Xi LC-2	N.A.		Retirado fevereiro 2009

Tabela A.24 – Satélites *BeiDou-1* BeiDou.

A.4.2. *BeiDou-2*

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
BeiDou-2 G1	16-01-2010	CZ-3C	Xi LC-2	C01	GEO	Operacional
BeiDou-2 G2	14-04-2009	CZ-3C	Xi LC-2	N.A.		Retirado
BeiDou-2 G3	02-06-2010	CZ-3C	Xi LC-2	C03		Operacional
BeiDou-2 G4	31-10-2010	CZ-3C	Xi LC-2	C04		Operacional
BeiDou-2 G5	24-02-2012	CZ-3C	Xi LC-2	C05		Operacional
BeiDou-2 G6	25-10-2012	CZ-3C	Xi LC-2	C02		Operacional
BeiDou-2 I1	31-07-2010	CZ-3A	Xi LC-3	C06	IGSO	Operacional
BeiDou-2 I2	17-12-2010	CZ-3A	Xi LC-3	C07		Operacional
BeiDou-2 I3	09-04-2011	CZ-3A	Xi LC-3	C08		Operacional
BeiDou-2 I4	26-07-2011	CZ-3A	Xi LC-3	C09		Operacional
BeiDou-2 I5	01-12-2011	CZ-3A	Xi LC-3	C10		Operacional
BeiDou-2 M1	13-04-2007	CZ-3A	Xi LC-3	C30	MEO	Manutenção
BeiDou-2 M2	18-09-2012	CZ-3B/ G1	Xi LC-2	C14		Operacional
BeiDou-2 M3	29-04-2012	CZ-3B/ G1	Xi LC-2	C11		Operacional
BeiDou-2 M4	29-04-2012	CZ-3B/ G1	Xi LC-2	C12		Operacional
BeiDou-2 M5	18-09-2012	CZ-3B/ G1	Xi LC-2	C13		Operacional

Tabela A.25 – Satélites *BeiDou-2* BeiDou.

A.4.3. BeiDou-3

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
BeiDou-3 I1-S	30-03-2015	CZ-3C/ YZ1	Xi LC-2	N.A.	IGSO	Em preparação
BeiDou-3 M1-S	25-07-2015	CZ-3B/ YZ1	Xi LC-2	N.A.	MEO	Em preparação
BeiDou-3 M2-S	25-07-2015	CZ-3B/ YZ1	Xi LC-2	N.A.		Em preparação

Tabela A.26 – Satélites *BeiDou-3* BeiDou.

A.5. Sistema INRSS

Até 31 de julho de 2015, o sistema IRNSS enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.c*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
IRNSS-1	4	4	0	0	0
Total	4	4	0	0	0

Tabela A.27 – Situação atual dos satélites IRNSS.

Local de lançamento	Designação
Sr FLP	Satish Dhawan Space Center First Launch Pad

Tabela A.28 – Locais de lançamento satélites IRNSS.

A.5.1. IRNSS-1

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
IRNSS-1A	01-07-2013	PSLV-C22	Sr FLP	193	IGSO	Operacional
IRNSS-1B	04-04-2014	PSLV-C24	Sr FLP	194	IGSO	Operacional
IRNSS-1C	15-10-2014	PSLV-C26	Sr FLP	195	GEO	Operacional
IRNSS-1D	28-03-2015	PSLV-C27	Sr FLP	196	IGSO	Operacional

Tabela A.29 – Satélites *IRNSS-1* IRNSS.

A.6. Sistema QZSS

Até 31 de julho de 2015, o sistema QZSS enviou para a órbita os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.d*):

Block	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação	Retirados	Lançamento falhado
QZS 1	1	1	0	0	0
Total	1	1	0	0	0

Tabela A.30 – Situação atual dos satélites QZSS.

Local de lançamento	Designação
Ta YLP-1	Tanegashima Space Center First Launch Pad 1

Tabela A.31 – Locais de lançamento satélites QZSS.

A.6.1. QZS 1

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Michibiki	11-09-2010	H-2A-202	Ta YLP-1	183	HEO	Operacional

Tabela A.32 – Satélites QZS1 QZSS.

A.7. Sistema EGNOS

Até 31 de julho de 2015, o sistema EGNOS utilizava os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.b*):

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Inmarsat 3-F2 (AOR-E)	02-03-2011	Proton-K Blok-DM1	Ba LC-81/23	120	GEO	Operacional
Astra 5B	22-03-2014	Ariane-5ECA	Ko ELA-3	123		Operacional
ESA-Artemis	12-07-2001	Ariane-5G	Ko ELA-3	124		Operacional
Inmarsat 4-F2 (IOR-W)	08-11-2005	Zenit-3SL (2)	SL	126		Operacional
Astra 4B	09-07-2012	Proton-M Briz-M	Ba LC-81/24	136		Operacional

Tabela A.33 – Satélites EGNOS.

A.8. Sistema WAAS

Até 31 de julho de 2015, o sistema WAAS utilizava os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.e*):

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Inmarsat 3-F3	18-12-1996	Atlas-2A	CC LC-36B	134	GSO	Retirado
Inmarsat 3-F4 (AOR-W)	03-06-1997	Ariane-44L H10-3	Ko ELA-2	122		Retirado
Inmarsat 4-F3	18-08-2008	Proton-M Briz-M	Ba LC-200/39	133		Operacional
Intelsat Galaxy 15	13-10-2005	Ariane 5GS	Ko ELA-3	135		Operacional
Telesat Anik F1R	08-09-2005	Proton-M Briz-M	Ba LC-200/39	138		Operacional

Tabela A.34 – Satélites WAAS.

A.9. Sistema MSAS

Até 31 de julho de 2015, o sistema MSAS utilizava os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.d*):

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Himawari 7	18-02-2006	H-2A-2024	Ta YLP-1	129	GSO	Operacional
Himawari 8	07-10-2014	H-2A-202	Ta YLP-1	137		Operacional

Tabela A.35 – Satélites MSAS.

A.10. Sistema SDCM

Até 31 de julho de 2015, o sistema SDCM utilizava os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.f*):

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
Luch-5A	11-12-2011	Proton-M/Briz-M	Ba LC-81/24	140	GEO	Operacional
Luch-5B	02-11-2012	Proton-M/Briz-M	Ba LC-81/24	125		Operacional
Luch-5V	28-04-2014	Proton-M/Briz-M	Ba LC-81/24	141		Operacional

Tabela A.36 – Satélites SDCM.

A.11. Sistema GAGAN

Até 31 de julho de 2015, o sistema GAGAN utilizava os seguintes satélites (Grayzeck, 2014) (Gunter Space, *s.d.c*):

Satélite	Data Lançamento	Veículo Lançamento	Local Lançamento	PRN	Tipo Órbita	Estado
GSAT-8	20-05-2011	Ariane-5ECA	Ko ELA-3	127	GEO	Operacional
GSAT-10	28-09-2012	Ariane-5ECA	Ko ELA-3	128		Operacional

Tabela A.37 – Satélites GAGAN.

A.12. Resumo satélites de navegação globais e regionais

Até 31 de julho de 2015, o total de satélites de navegação enviados para a órbita e operacionais dos vários sistemas globais e regionais, são os seguintes:

Sistema	Lançados	Operacionais	Testes/ Manutenção/ Preparação
GPS	70	30	2
GLONASS	132	24	4
Galileo	10	3	5
BeiDou	23	14	4
IRNSS	4	4	0
QZSS	1	1	0
Total	240	76	15

Tabela A.38 – Tabela resumo dos satélites de navegação globais e regionais.

Anexo B. Notas sobre o GPS Toolkit

B.1. O que é o GPSTk?

O GPSTk é um projeto do tipo *open source software* patrocinado pelo *Space and Geophysics Laboratory* do *Applied Research Laboratories of the University of Texas* (ARL: UT), iniciado ainda antes do lançamento do primeiro satélite em 1978 (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013a). O GPSTk, beneficia colaborações a nível mundial e resultou do esforço combinado de muitos estudiosos de sistemas de navegação por satélite e de engenheiros de *software* para a sua criação. O seu principal objetivo é o de providenciar uma biblioteca de *software* gratuito e um conjunto de aplicações que permitem realizar o processamento de dados GNSS, disponíveis para a comunidade de navegação por satélite.

A primeira versão do GPSTk foi concluída em 2004 e apresentada pela primeira vez no ION-GNSS-2004 (Institute of Navigation Conference). No âmbito da *Lesser GNU Public License* (LGPL), que disponibiliza o *software* GPSTk, dá o direito aos utilizadores e investigadores, de utilizá-lo, optando por modificar ou redistribuir o código principal (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013a). A LGPL não exige que os trabalhos realizados, com base no GPSTk, adotem uma licença de *open source*, o que faz dele uma opção prática para projetos pessoais e comerciais.

B.2. Porque o GPSTk?

Uma das grandes vantagens do GPSTk está na sua flexibilidade e facilidade de utilização. O GPSTk suporta uma ampla variedade de funções, necessárias para o processamento de dados GNSS, sendo uma excelente opção para os estudantes, que intendam criar o seu próprio *software* para aplicações relacionadas com o GNSS (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013a). Face ao conjunto de rotinas já testadas e o código base que pode ser incorporado em qualquer projeto, permite a quem o faça, reduzir o esforço em termos de programação e dedicar-se mais especificamente no desenvolvimento das particularidades do seu projeto.

Qualquer utilizador do GPSTk pode juntar-se à comunidade de programadores, discutindo e contribuindo com as suas próprias rotinas, para o desenvolvimento de

software, no âmbito do *GPSTk Mission*, apresentando o seu código, que posteriormente, é fornecido no *open source Sourceforge* (<http://sourceforge.net/>).

Concluindo, os principais objetivos deste projeto são a portabilidade, modularidade, facilidade de utilização, extensibilidade e facilidade de manutenção, de forma a apoiar a investigação e o desenvolvimento, que permitem, maximizar o número de possíveis utilizadores e fontes da biblioteca, ao diminuir o esforço e custos com a manutenção a longo prazo (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013a).

B.3. Documentação e fontes de informação do GPSTk

A principal fonte de conhecimento sobre o GPSTk, é o guia de utilizador, que se encontra disponível em: <http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/UsersGuide>. Para além deste, está disponível e útil no website dos seus criadores informação, de uma forma mais resumida, que deve ser lida antes de se começar a desenvolver as aplicações (Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, 2013a).

Começando no *homepage* do website acima referido, pode-se seguir os links para obter informações relativas a:

- Requisitos do sistema necessários para construir rotinas com recurso ao GPSTk, download e instalação;
- Publicações e apresentações dedicadas ao GPSTk e publicações de pesquisa utilizando o GPSTk em ficheiros PDF;
- Funcionalidade proporcionada pela biblioteca GPSTk, que pode ser encontrada na *Application Programmer Interface* (API) gerado pela *Doxygen*, gerada diariamente a partir do repositório *Subversion GPSTk*: <http://www.gpstk.org/doxygen/>;
- Fazer perguntas de apoio que auxiliem o conhecimento sobre o tema;
- Alguns exemplos de programação com GPSTk.

B.4. Download e instalação para MS Windows

B.4.1. Download e instalação do MS Visual C++

O produto *Microsoft Visual Studio*, compilador de linguagem em C++ está disponível para *download* no site da *Microsoft* (<https://www.visualstudio.com/downloads/>), o qual inclui todos os recursos para trabalhar com a biblioteca GPSTk e arquivos de origem.

Para o processo de instalação, basta seguir as opções recomendadas e, após esta, pode-se visitar o *Microsoft Update*, para verificar se há atualizações mais recentes para o nosso computador.

B.4.2. Download e instalação da última versão segura do GPSTk

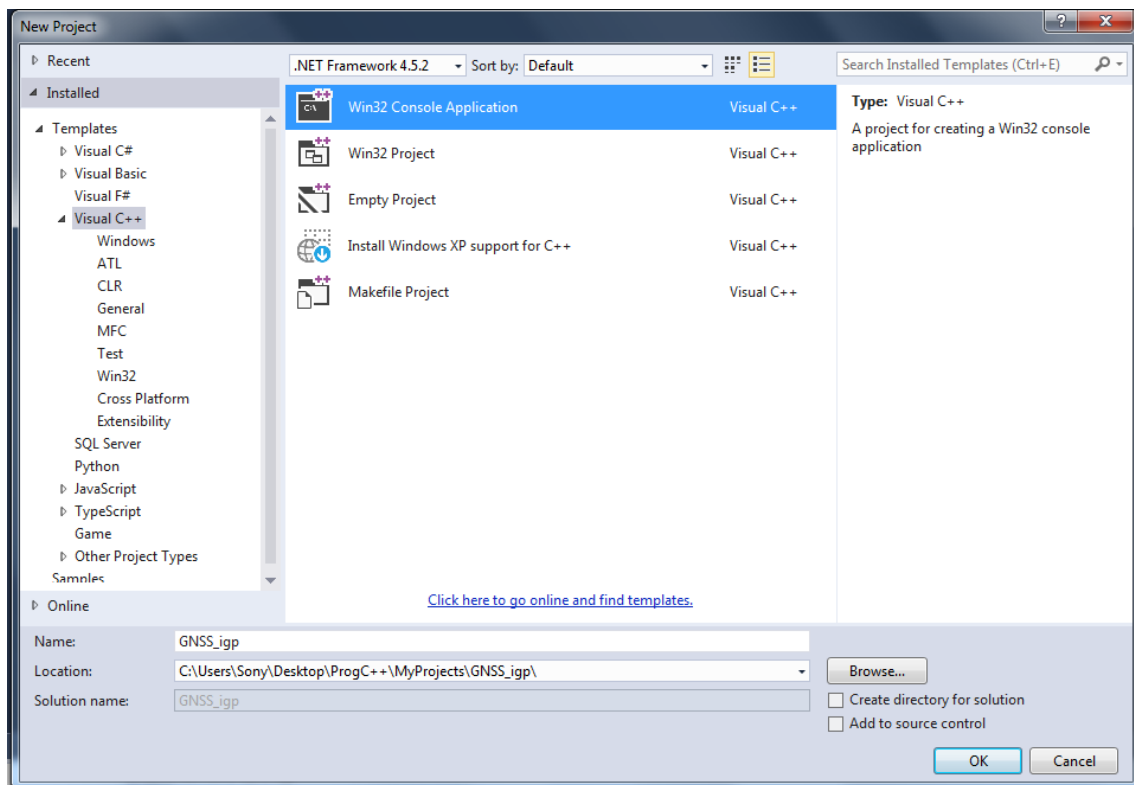
A última versão segura, **gpstk-2.5**, para utilização geral, está disponível *online* no *Sourceforge* (<http://sourceforge.net/projects/gpstk/files/gpstk/>) para a maioria das plataformas de *desktop*.

Para o processo de instalação, basta seguir as opções recomendadas e, será criado uma diretoria com todos os arquivos *lib.*, *hpp* e *exe* já compilados, prontos para serem ligados ao projeto em C++.

B.5. Desenvolver um projeto em C++ utilizando os ficheiros GPSTk pré-compilados

Seguir os passos pela ordem descrita e de acordo com o *Windows* (Marreiros, 2012) :

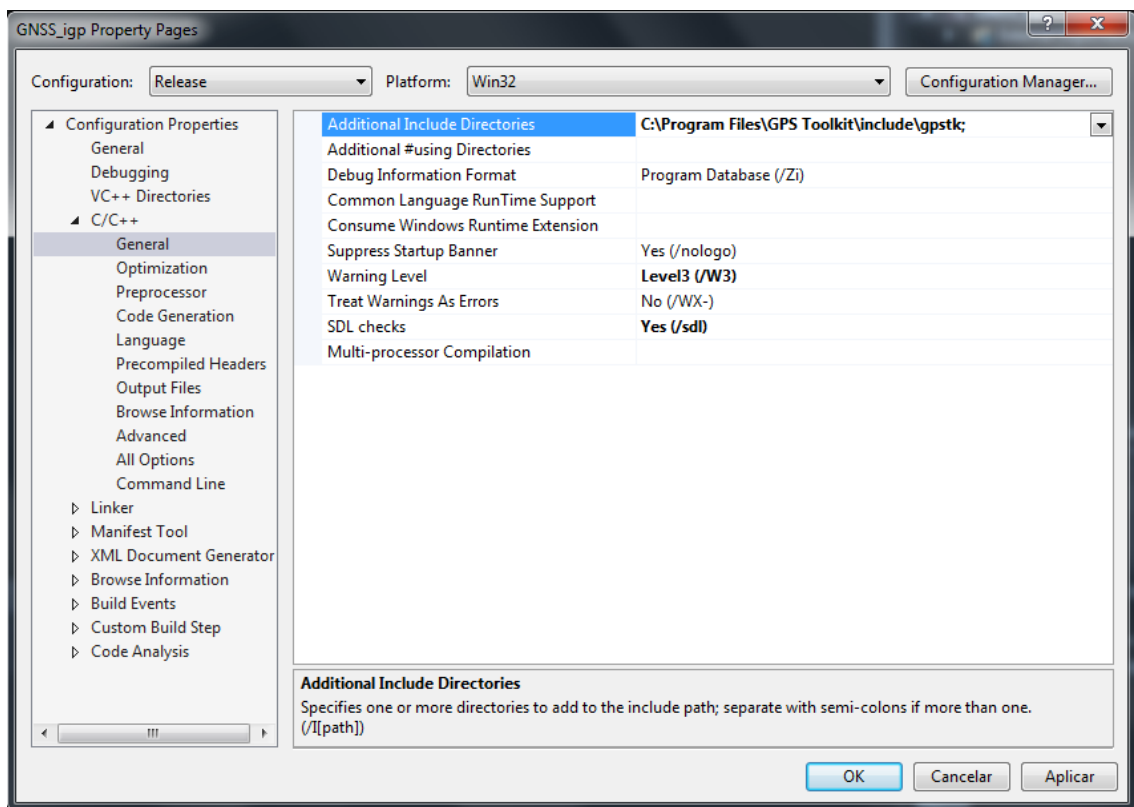
- Iniciar o compilador *MS Microsoft Visual C++*;
- No menu, seleccionar *File -> New -> Project*, e seleccionar como na figura abaixo:



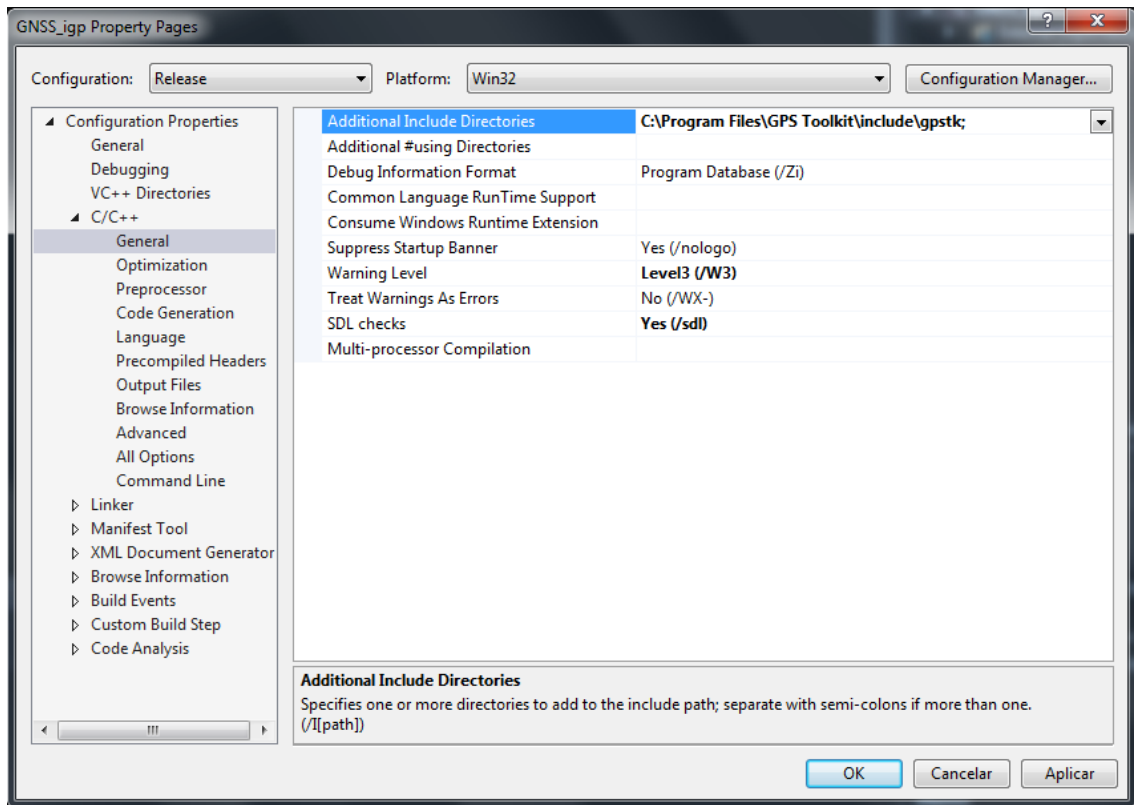
- Introduzir o nome do *Project*, seleccionar a localização e não criar uma diretoria para solução;
- Na próxima janela, clicar *Finish*. Isto irá criar uma aplicação com o cabeçalho pré-compilado;

O nosso projeto está pronto para ser interligado com os ficheiros *lib* e *hpp* pré-compilados do GPSTk, mas é necessário mudar as propriedades do projeto, de acordo com o seguinte:

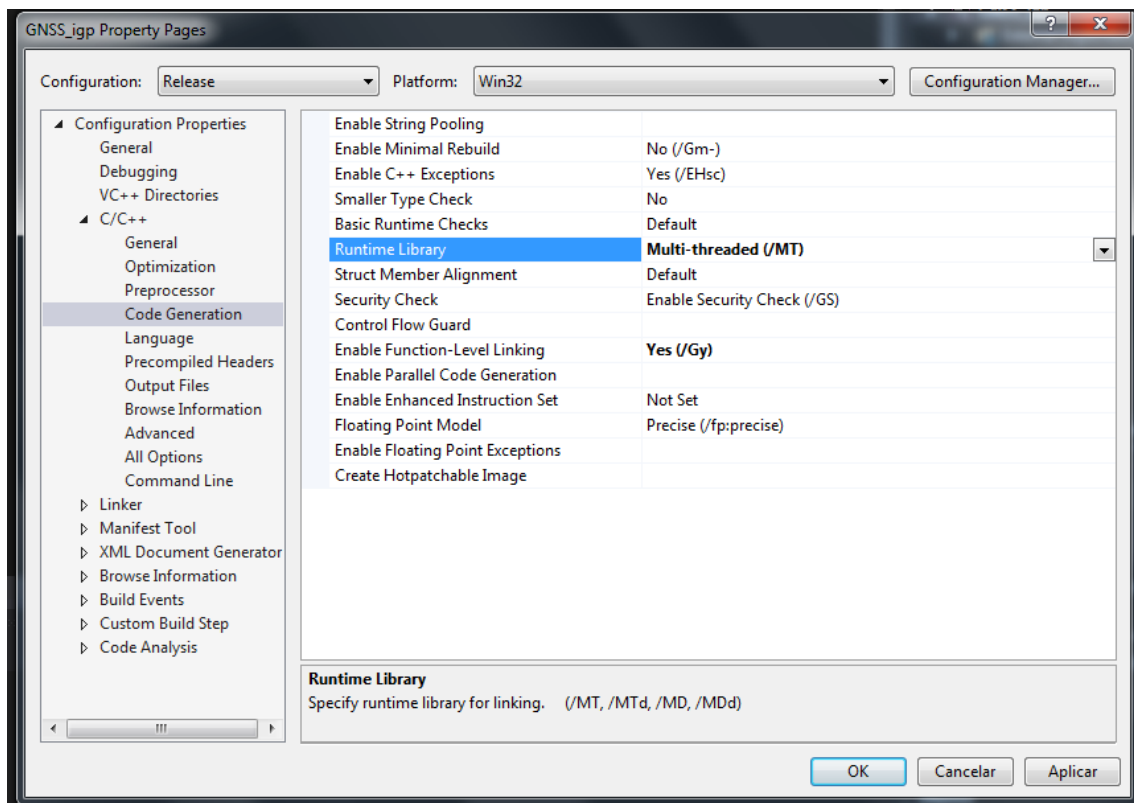
- Seleccionar as propriedades do projeto, clicando no nome do projeto na janela de solução do explorador com o botão direito do rato. As propriedades do projeto serão mostradas;
- Alterar a configuração da solução de *Active (Debug)* para *Release*;



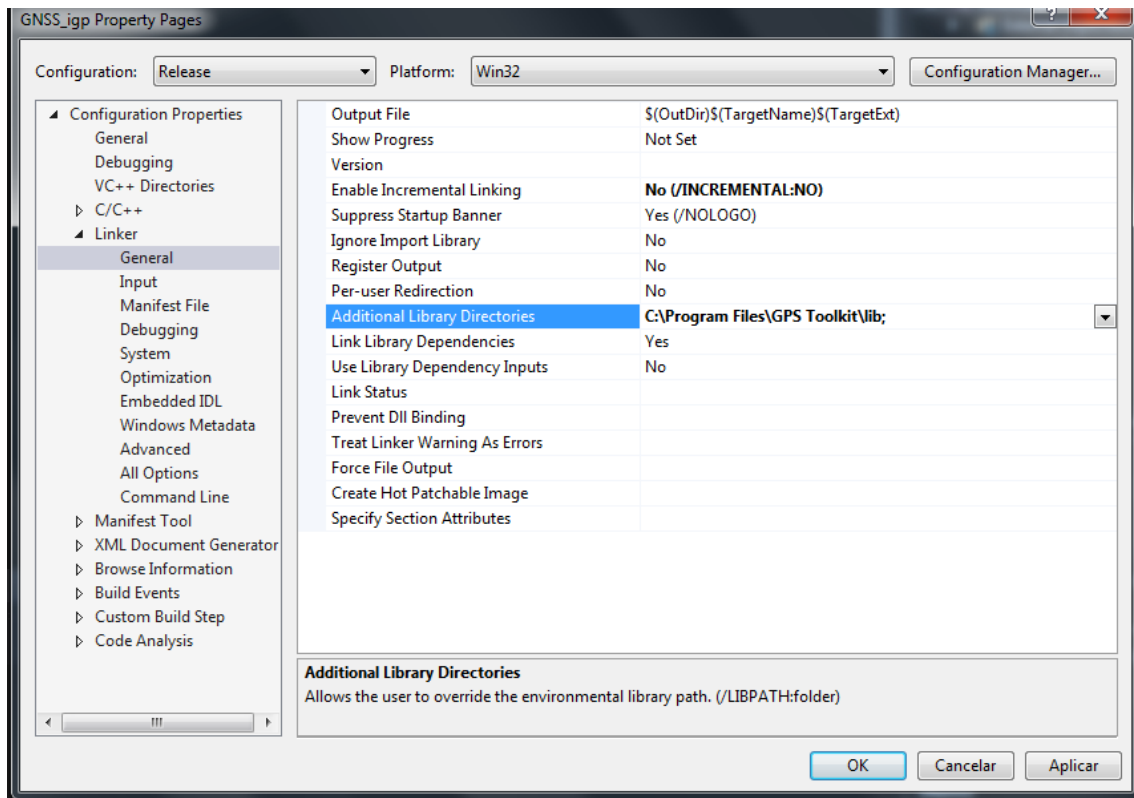
- Em *Additional Include Directories*, incluir a diretoria do GPSTk que está na diretoria `...\GPSTK2_5\include` e `...\GPSTK2_5\regex`;



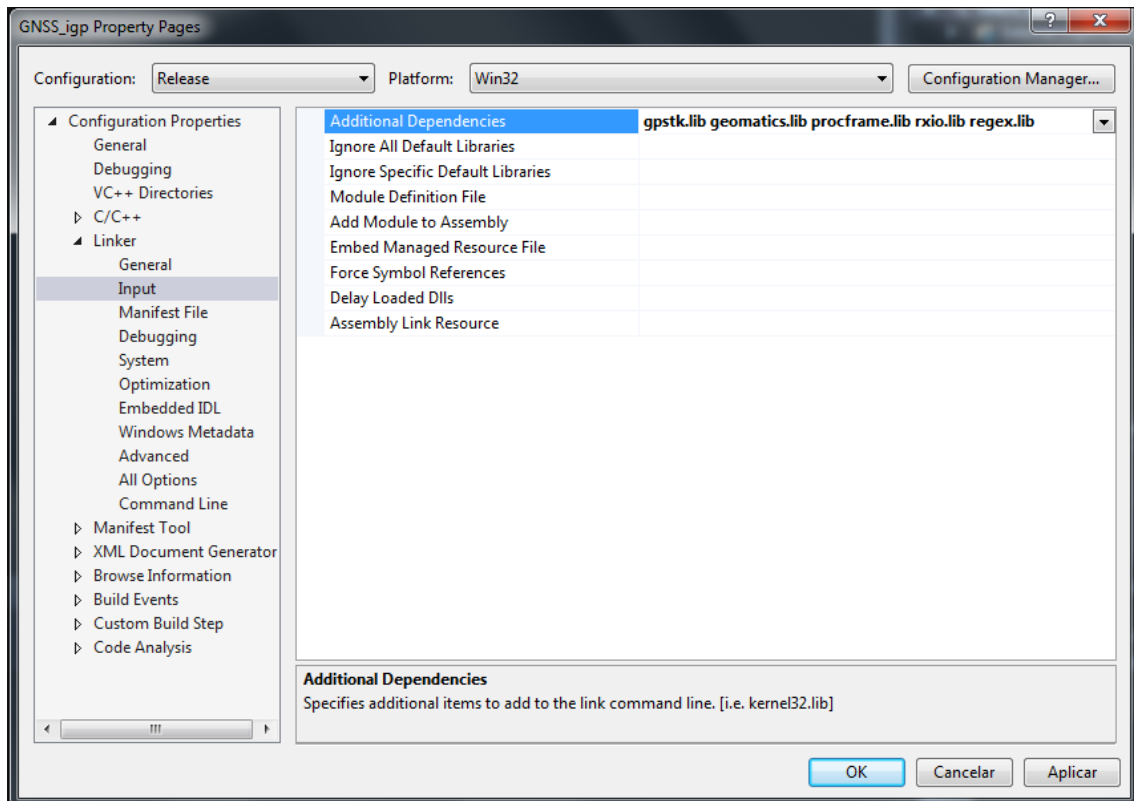
- Alterar o *Runtime Library* para *Multi-threaded(/MT)*;



- Em *Additional Library Directories*, incluir a diretoria do GPSTk que está na diretoria ...\\GPSTK2_5\\lib e ...\\GPSTK2_5\\regex;



- Introduzir: **gpstk.lib;geomatics.lib;procframe.lib; rxio.lib regex.lib.**



B.6. Desenvolver um projeto do GPSTk em *MS Windows*

As informações sobre este tópico são fornecida em:

<http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/BuildingGPSTkUnderWindows>.

O GPSTk não é suportado pelas versões do *Microsoft Visual C++ 6.0* ou anteriores, porque os modelos das classes não são suportados. Atualmente, existe suporte para o *Microsoft Visual Studio Express 2012 32-/64-bit (versão 11)*. Enquanto os ficheiros concebidos para o *Microsoft Visual C++* não são fornecidos no conjunto de ferramentas, o *CMake* irá gerar ficheiros *Visual Studio Project* a partir do código existente.

Segue-se os passos necessários para desenvolver um projeto em *Microsoft Visual Studio – Cmake e Visual Studio IDE*:

- Certificar se os pré-requisitos, tais como o *CMake* (<http://www.cmake.org/>) estão instalados;
- Fazer *download* do GPSTk para o sistema operativo;
- Extrair o ficheiro GPSTk **gpstk-2.5.src.tar**, utilizando por exemplo o WinRAR;
- Abrir a janela de comando (Command Prompt, Git Bash, ou Windows PowerShell) na qual se pode construir o ficheiro do Visual Studio Project com o CMake;
- Criar uma diretoria para o projeto. Por exemplo, alterar para **gpstk/** diretoria e tipo da seguinte forma **gpstk/build_VS2015** ou noutra diretoria escolhida, que será o local onde todos os arquivos de construção e de projeto irão ficar armazenados;
- Se o GPSTk for instalado como uma aplicação do sistema em **C:/Project Files** ou **C:/Project Files (x86)**, apenas o gerador CMake deve ser declarado ao construir os ficheiros do projeto;
- Na diretoria **...Microsoft Visual Studio 14.0\Common7\IDE**, executar o seguinte comando:

"Visual Studio 15" ../ ou **../dev** (se utilizarmos Developer repo)

- Após o CMake instalado, abrir o *Visual Studio 2015*;
- Clicar com o lado esquerdo do rato no ficheiro e escolher *Open Project*;
- No *File Explorer*, navegar até à pasta de construção e escolher o ficheiro de projeto do VS, **gpstk.sln**;

- Esperar até o *Visual Studio* carregar completamente o projeto e terminar os ficheiros de indexação;
- No painel *Solution Explorer*, poder-se-á ver os vários projetos que compõem o GPSTk, incluindo o *ALL_BUILD*, que irá construir todos os projetos, exceto para *INSTALL*;
- Para construir o GPSTk, clicar com o lado direito do rato em *ALL_BUILD* e com o lado esquerdo em *build*;
- Uma vez terminada a construção do ficheiro pelo *Visual Studio*, verificar se todos os projetos foram construídos e não ocorreram erros;
- Para instalar o GPSTk, navegar até ao painel *Solution Explorer*, clicar com o lado direito do rato em *INSTALL* projeto e com o lado esquerdo em *build*;
- Uma vez terminada a instalação dos binários pelo *Visual Studio*, verificar se não ocorrem erros;
- Para verificar se as aplicações estão a funcionar, abrir uma janela de comando (*Command Prompt* ou *Windows PowerShell*), navegar até à pasta de instalação de destino e executar uma aplicação.

B.7. Instalação do *Regex* para *MS VC++*

Para iniciar o GPSTk será necessário o apoio do sistema *regular expression* (*regex*). Todas as plataformas suportadas exceto *MS VC++* no *Windows*, fornecem esta funcionalidade.

Existem várias maneiras de isso poder ser fornecido ao *Visual C++*, no entanto a abordagem seguinte tem sido e continuará a ser testada:

1. Fazer *download* da instalação do *Regex* (<http://gnuwin32.sourceforge.net/>);
2. Correr a instalação e instalar na localização escolhida (exemplo **c:\Program Files\GnuWin32**);
3. Escolher *Full installation*;
4. Atualizar o *PATH*, *LIB*, e a variável *INCLUDE* nas opções de configuração do compilador para a nossa plataforma com os *paths* na nova biblioteca *regex* instalada. Por exemplo:

C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 11.0\Common7\Tools\vsvars32.bat. Adicionar **c:\Program Files\GnuWin32\include** (ou a diretoria apropriada instalada) para a variável *INCLUDE*, **c:\Program Files\GnuWin32\lib** para a variável *LIB*, e **c:\Program Files\GnuWin32\bin** para a variável *PATH*. Encontra-se a seguir os passos detalhados para a modificação de um sistema, utilizando a versão *Microsoft Visual Studio 2015*:

A construção é corrida com o comando:

C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 14.0\VC\vcvarsall.bat.

O *regex* é instalado na diretoria **c:\Program Files\GnuWin32\lib**. Os ficheiros aí existentes são *libregex.dll.a*, *libregex.la*, *regex-bcc.lib*, *regex.lib* e *regex2.def*. Na diretoria **GnuWin32\include** está o ficheiro *regex.h*;

É recomendável que seja adicionada uma biblioteca *regex* ao sistema da variável *PATH* de forma a evitar adicionar o nosso caminho cada vez que correremos ou compilarmos o programa GPSTk. Isto pode ser feito, da seguinte forma:

5. Clicando *Iniciar*, clicando com o botão do lado direito do rato *Meu Computador*, e clicar *Propriedades*;
6. Ir até à aba *Avançadas*;
7. Clicar *Variáveis de Ambiente*;
8. Editar a variável *PATH*, se não existir, criá-la.
9. Acrescentar o caminho para a diretoria *bin* na localização onde foi instalado o *GNUWin32 Regex*. Normalmente em **C:\Program Files\GnuWin32\bin**, podendo-se colocar usualmente ponto e vírgula antes da localização para anexar uma diretoria de variável *Path*.

Para este sistema, o ficheiro atualizado estava em

C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 14.0\Common7\Tools\vsvars32. bat.

B.8. Download CMake para MS VC++

A última versão segura, CMake-3.2.3, para utilização geral, está disponível *online* no website do CMake (<http://www.cmake.org/>) para a maioria das plataformas de desktop.

B.9. *Download* e instalação do *Gnuplot* para *MS VC++*

A última versão segura, gnuplot-5.0.1, para utilização geral, está disponível on-line no Sourceforge (<http://sourceforge.net/projects/gnuplot/files/>) para a maioria das plataformas de desktop.

Para o processo de instalação, basta seguir as opções recomendadas e, será criado uma diretoria com todos os arquivos deste programa, prontos para ler a informação obtida com o C++ e representá-la graficamente.

Anexo C. Código de processamento de dados GNSS

Este anexo contém o código recriado e desenvolvido, do programa de processamento de dados brutos GNSS, o ficheiro de configuração para a definição dos parâmetros e o código introduzido no *Gnuplot* para gerar os gráficos obtidos.

C.1. Código em C++ com recurso ao GPSTk

O exemplo que se segue é respeitante ao ficheiro de configuração para o processamento dos dados referentes aos dados combinados da estação do IGEO. Para o navio NRP Auriga, foi retirado a parte respeitante ao GLONASS, dado não existirem dados de posicionamento e tempo deste sistema para esta estação.

```
// This program shows a minimalist (SPS) way to process GNSS data based on GPSTk.

// C++ Library classes
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <direct.h>

// Class for handling satellite observation parameters RINEX files
#include "Rinex3ObsStream.hpp"

// Classes for handling RINEX Broadcast ephemeris files
#include "Rinex3NavStream.hpp"
#include "Rinex3NavHeader.hpp"
#include "Rinex3NavData.hpp"

// Class in charge of the GPS signal modelling
#include "ModelObs.hpp"

// Class to store satellite broadcast navigation data
#include "GPSEphemerisStore.hpp"
#include "GloEphemerisStore.hpp"

// Class to model the tropospheric delays
#include "TropModel.hpp"

// Classes to model and store ionospheric delays
#include "IonoModel.hpp"
#include "IonoModelStore.hpp"

// Class to solve the equation system using Least Mean Squares
#include "SolverLMS.hpp"

// Class defining the GNSS data structures
#include "DataStructures.hpp"

// Class to filter out observables grossly out of limits
#include "SimpleFilter.hpp"

// YDS Time-class
#include "YDSTime.hpp"
```

```

// Class to read configuration file
#include "ConfDataReader.hpp"

using namespace std;
using namespace gpstk;

int main(void)
{
    //Open configuration file
    ConfDataReader confReader;    // Configuration file reader

    try
    {
        confReader.open("GNSS_Conf.txt");
    }
    catch (...)
    {
        cerr << " Problem opening default configuration file " << endl;
        exit(-1);
    }

    confReader.setFallback2Default(true);    // If a given variable is not found
                                           // in the provided section, then
                                           // 'confReader' will look for it in
                                           // the DEFAULT section
                                           // Each section name will be read in
                                           // alphabetical order

    string station;
    string directory;
    string outName;
    char *temp;
    char *UserInputDir;
    ofstream outfile;

    GPSEphemerisStore gpsStore;    // Store the gps in bceStore
    GloEphemerisStore gloStore;    // Store the glonass in gloStore
    Rinex3NavStream gpsEphFile;    // Object to store gps RINEX ehperemeris data
    Rinex3NavStream gloEphFile;    // Object to store glonass RINEX ehperemeris
    // data
    Rinex3NavData rNavData;    // RINEX data object
    Rinex3ObsStream rObsFile;    // Object to store RINEX observation data
    Rinex3NavHeader rNavHeader;    // Object to read the header of Rinex
    // Navigation File
    Rinex3ObsHeader rObsHeader;    // Object to read the header of Rinex
    // Observation File
    IonoModelStore ionoStore;    // Object to store ionospheric models
    IonoModel ioModel;    // Declare a Ionospheric Model object

    while ((station = confReader.getEachSection()) != "")
    {
        if (station == "DEFAULT")    // The default section will be skipped
        {                            // because it is expected a specific
                                     // station. However if data is missing
                                     // it will be looked for it in the
            continue;                // DEFAULT section
        }

        cout << "Starting processing for station: '" << station << "'." << endl;

        try                            // Go to data directory

```

```

{
    directory = confReader.getValue("directory", station);
    chdir(&directory[0]);
    cout << "Data directory: " << directory << endl;
}
catch (...)
{
    cerr << "Problems with directory '" << directory << "'." << endl;
    exit(-1);
}

// FILE INITIALIZATION PART
// Load Rinex observation data
    cout << "Loading RINEX observation data... " <<
confReader.getValue("rinexObsFile", station) << endl;

    //Rinex3ObsStream rObsFile;           // Object to store RINEX
                                           // observation data
    rObsFile.exceptions(ios::failbit);    // Enable exceptions
    try
    {
        rObsFile.open(confReader("rinexObsFile", station), std::ios::in);
    }
    catch (...)
    {
        cerr << "Problems opening file '" << confReader.getValue("rinexObsFile",
station) << "'." << endl;
        rObsFile.close();
        continue;
    }
    // End of Load Rinex observation data

    // Load Rinex gps ephemeris data
    cout << "Loading GPS RINEX ephemeris data... " << confReader("gpsEphFile",
station) << endl;

    //Rinex3NavStream gpsEphFile;         // Object to store gps RINEX
                                           // ephemeride data
    gpsEphFile.exceptions(ios::failbit);  // Enable exceptions

    try
    {
        gpsEphFile.open((const char *)confReader("gpsEphFile", station).c_str(),
std::ios::in);
    }
    catch (...)
    {
        cerr << "Problems opening file '" << confReader.getValue("gpsEphFile",
station) << "'." << endl;
        //
        gpsEphFile.close();
        continue;
    }

    // We need to read ionospheric parameters (Klobuchar model) from the gps
    // navigation header
    gpsEphFile >> rNavHeader;

    while (gpsEphFile >> rNavData)
        gpsStore.addEphemeris(rNavData);

```

```

        gpsStore.SearchNear();
        gpsStore.dump(cout);

        // Load Rinex gps ephemeris data
        cout << "Loading GLONASS RINEX ephemeris data... " <<
        confReader("glonassEphFile", station) << endl;

        //Rinex3NavStream gloEphFile;           // Object to store glonass RINEX
                                                // ephemeride data
        gloEphFile.exceptions(ios::failbit);    // Enable exceptions
        try
        {
            gloEphFile.open((const char *)confReader("glonassEphFile",
station).c_str(), std::ios::in);
        }
        catch (...)
        {
            cerr << "Problems opening file '" <<
            confReader("glonassEphFile", station) << "'." << endl;

            gloEphFile.close();
            continue;
        }

        // We need to read ionospheric parameters (Klobuchar model) from the
        // glonass navigation header
        gloEphFile >> rNavHeader;

        while (gloEphFile >> rNavData)
            gloStore.addEphemeris(rNavData);
        gloStore.dump(cout);

        // End of Load Rinex ephemeris data
    }

    cout << fixed << setprecision(8);    // Set a proper output format precision

    // We need to read the aproximate position from the position header
    rObsFile >> rObsHeader;

    // Let's feed the ionospheric model (Klobuchar type) from data in the
    // navigation (ephemeris) file header.
    // First, we must check if there are valid ionospheric correction parameters
    // in the header
    if (rNavHeader.valid & Rinex3NavHeader::validIonoCorrGPS)
    {
        // Extract the Alpha and Beta parameters from the header
        double* ionAlpha = rNavHeader.mapIonoCorr["GPSA"].param;
        double* ionBeta = rNavHeader.mapIonoCorr["GPSB"].param;

        // Feed the ionospheric model with the parameters
        ioModel.setModel(ionAlpha, ionBeta);
    }
    else
    {
        cerr << "WARNING: Navigation file "
            << "doesn't have valid ionospheric correction parameters." << endl;
    }

    // Beware: In this case, the same model will be used for the full data span

```

```

ionoStore.addIonoModel(CommonTime::BEGINNING_OF_TIME, ioModel);

// Station nominal position
Position nominalPos(rObsHeader.antennaPosition); // Read the nominal position
                                                    // the Rinex Observation File

// Declare a MOPSTropModel object, setting the defaults
MOPSTropModel mopsTM(nominalPos.getGeodeticLatitude(),
nominalPos.getAltitude(), 167);

// Declare the modeler object, setting all the parameters in one pass
ModelObs modelRef(nominalPos, ionoStore, mopsTM, gpsStore,TypeID::C1);

// Declare SolverLMS object
SolverLMS solver;

// Declare a simple filter object. By default, it filters C1
SimpleFilter myFilter;

// This is the GNSS data structure that will hold all the GNSS-related
// information
gnssRinex gRin;

// PREPARE OUTPUT FILES
try
{
    outName = confReader.getValue("outputFile");
    outfile.open(outName, ios::out);
    outfile << fixed << setprecision(8);
}
catch (...)
{
    cerr << "Problems with outputfile '" << outName << "'." << endl;
    exit(-1);
}
// END OF PREPARE OUTPUT FILES

// Loop over all data epochs
while (rObsFile >> gRin)
{
    try
    {
        // This is the line that will process all the GPS data
        gRin.keepOnlyTypeID(TypeID::C1) >> myFilter >> modelRef >> solver;
        // First: Wipe off all data that we will not use (may be skipped)
        // Second: Filter out observables out of bounds (may be skipped)
        // Third: The resulting data structure will feed the modeler object
        // Fourth: The resulting structure from third step will feed the solver
        // object
    }
    catch (...)
    {
        cerr << "Exception at epoch: " << gRin.header.epoch << endl;
    }

    // Fifth: Get your results out of the solver object and print them.
    // That is all
    Position solPos((modelRef.rxPos.X() + solver.solution[0]),
                    (modelRef.rxPos.Y() + solver.solution[1]),
                    (modelRef.rxPos.Z() + solver.solution[2]));
}

```

```

// Output para o display
cout << static_cast<YDSTime>(gRin.header.epoch).sod << " "; // Output
// field #1

cout << solPos.X() << " "; // Output field #2
cout << solPos.Y() << " "; // Output field #3
cout << solPos.Z() << " "; // Output field #4
cout << solPos.longitude() << " "; // Output field #5
cout << solPos.geodeticLatitude() << " "; // Output field #6
cout << solPos.height() << " "; // Output field #7
cout << endl;

// Output para o ficheiro
outfile << static_cast<YDSTime>(gRin.header.epoch).sod << " "; // Output
// field #1

outfile << solPos.X() << " "; // Output field #2
outfile << solPos.Y() << " "; // Output field #3
outfile << solPos.Z() << " "; // Output field #4
outfile << solPos.longitude() << " "; // Output field #5
outfile << solPos.geodeticLatitude() << " "; // Output field #6
outfile << solPos.height() << " "; // Output field #7
outfile << endl;
}

exit(0);

} // End of 'main()'

```


C.2. Ficheiro de Configuração

O exemplo que se segue é respeitante ao ficheiro de configuração para o processamento dos dados referentes a um período de navegação do NRP Auriga, que serve de entrada dos parâmetros para o processamento com o programa. Na configuração dos dados do IGEO apenas foi acrescentado o ficheiro do sistema GLONASS e substituídos os abaixo referidos pelos fornecidos por esta estação.

```
# THIS IS AN EXAMPLE OF A CONFIGURATION FILE FOR PROGRAM GNSS_a

cutOffElevation, = 10.0, in degrees

# Change the following parameter to TRUE if your RINEX observation files
# don't include P1, and you want to use C1 instead. Please be aware that
# if you use C1 instead of P1 to compute PC combination, instrumental errors
# will NOT cancel, introducing a bias that must be taken into account by
# other means. This bias won't be corrected in this application.

useC1 = TRUE

# IMPORTANT NOTE:

# It turns out that some receivers don't correct their clocks from drift.
# When this happens, their code observations may drift well beyond what it is
# usually expected from a pseudorange. In turn, this effect causes that
# "SimpleFilter" objects start to reject a lot of satellites.
# Thence, the "filterCode" option allows you to deactivate the "SimpleFilter"
# object that filters out C1, P1 and P2, in case you need to.

filterCode = TRUE

filterPC = TRUE

maxPsdrgLimit = 50000000, metres

minPsdrgLimit = 15000000, metres

# Output

precision = 8, number of decimal places in output file

outputFile = GNSS_Auriga.out
```

```
### Application "StarPos" demands one section (and only one)

### per GPS receiver station

# Configuration data for 'GNSS_Auriga' station

[GNSS_Auriga]

# Directory and files

directory = C:\Data\Auriga

rinexObsFile = port167.07o

gpsEphFile = port167.07n

glonassEphFile =

# The following variable, if true, sets a NEU system. If false, an XYZ system

USENEU = FALSE, if true results will be given in dLat, dLon, dH

# End of configuration file
```

C.3. Código do *Gnuplot*

O exemplo que se segue é respeitante ao código introduzido no programa *Gnuplot*, para elaboração dos gráficos obtidos em 2D e 3D do NRP Auriga. Os restantes gráficos foram elaborados dentro dos mesmos moldes.

```
gnuplot> cd 'C:\Data\Auriga'

gnuplot> set title "Processamento de Dados GNSS NRP Auriga"

gnuplot> set linetype 1 lc rgb "blue"

gnuplot> set linetype 2 lc rgb "red"

gnuplot> set xlabel "Tempo (s)      "

gnuplot> set ylabel "Altitude (m)    "

gnuplot> plot 'GNSS_NRP_Auriga.out' using 1:7

gnuplot> set xlabel "Longitude E (°)  "

gnuplot> set ylabel "Latitude N (°)   "

gnuplot> plot 'GNSS_NRP_Auriga.out' using ($5-360):6

gnuplot> rep

gnuplot> set xlabel "Longitude E (°)  "

gnuplot> set ylabel "Latitude N (°)   "

gnuplot> set zlabel "Altitude (m)     "

gnuplot> set style data lines

gnuplot> splot 'GNSS_NRP_Auriga.out' using ($5-360):6:7

gnuplot> rep
```


Anexo D. Fontes de informação sobre o GNSS

As principais fontes de informação disponíveis sobre os sistemas, encontram-se nos websites oficiais das entidades responsáveis por estes, que divulgam todo o tipo de conhecimentos aos utilizadores dos serviços deste sistema. Para além disso é possível encontrar, vários documentos sobre toda a arquitetura e estrutura do sistema.

D.1. GNSS

Os websites recomendáveis para consulta ou obtenção de mais informação sobre os GNSS são:

- <http://www.igs.org/> - Site oficial do *International GNSS Service*, com informação sobre todos os sistemas de navegação;
- <https://www.ion.org/> - Site oficial do *Institute of Navigation*, dedicado à arte e ciência de posicionamento, navegação e tempo;
- <http://www.insidegnss.com/> - Site oficial do *Gibbons Media & Research LLC*, com notícias diárias sobre os sistemas GNSS, RNSS e SBAS existentes;
- <http://www.novatel.com/> - Site oficial da empresa *NovAtel*, com novidades e inovações das tecnologias dos GNSS;
- <http://www.nasa.gov/> - Site oficial da *National Aeronautics and Space Administration*, agência do governo americano responsável pela pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial, com informação detalhada de todos os satélites de navegação em órbita;
- <http://space.skyrocket.de/index.html> - Site oficial de *Gunter Dirk Krebs*, com detalhes sobre todos os satélites de navegação dos Estados detentores destes.

D.2. GPS

Os websites recomendáveis para consulta ou obtenção de mais informação sobre o GPS são:

- <http://www.gps.gov/> - Site oficial do *U.S. Government*, com informação sobre o sistema GPS;

- <http://www.afspc.af.mil/> - Site oficial da *U.S. Air Force*, direcionado para as operações aeroespaciais;
- <http://www.navcen.uscg.gov/> - Site oficial da *U.S. Coast Guard Navigation Center*, no âmbito da navegação;
- <http://www.faa.gov/> - Site oficial da *Federal Aviation Administration*, direcionada para a navegação aérea;
- <http://gpsworld.com/> - Site oficial da *North Coast Media*, com notícias diárias sobre GPS, mas também de outros GNSS.

D.3. GLONASS

Os websites recomendáveis para consulta ou obtenção de mais informação sobre o GLONASS são:

- <https://www.glonass-iac.ru/en/> - Site oficial da *Federal Space Agency*, com informação e análise do sistema GLONASS;
- <http://www.nis-glonass.ru/en/> - Site oficial *Navigation Information Systems GLONASS*, direcionado para os serviços de navegação do sistema;
- <http://www.spacecorp.ru/> - Site oficial do Sistema Espacial Russo, sobre os serviços e comercialização do sistema no âmbito das aplicações;
- <http://www.russianspaceweb.com/> - Site com notícias sobre GLONASS, com a história e desenvolvimento;
- <http://sputniknews.com/> - Site oficial do *Sputnik International*, com notícias diárias, onde se incluem as sobre os satélites GLONASS e implementação deste a nível civil e militar.

D.4. Galileo

Os websites recomendáveis para consulta ou obtenção de mais informação sobre o Galileo são:

- <http://www.esa.int/ESA> - Site oficial da *European Space Agency*, com informação detalhada sobre todo o sistema Galileo;

- <http://www.gsa.europa.eu/> - Site oficial da *European Global Navigation Satellite System Agency*, com esclarecimentos mais pormenorizados sobre os componentes e arquitetura;
- <http://ec.europa.eu/> - Site oficial da *European Commission*, com notícias entre as quais, sobre o desenvolvimento e projeto do sistema.

D.5. BeiDou

O website recomendável para consulta ou obtenção de mais informação sobre o BeiDou é:

- <http://en.beidou.gov.cn/> - Site oficial do *BeiDou Navigation Satellite System*, com informação detalhada e notícias diárias sobre o sistema BeiDou.

D.6. IRNSS

O website recomendável para consulta ou obtenção de mais informação sobre o IRNSS é:

- <http://irnss.isro.gov.in/> - Site oficial do *Indian regional Navigation Satellite System*, que requer autorização para aceder, dispondo de todo o tipo de informação e detalhes sobre o sistema IRNSS;

D.7. QZSS

O website recomendável para consulta ou obtenção de mais informação sobre o QZSS é:

- <http://global.jaxa.jp/index.html> - Site oficial da *Japan Aerospace Exploration Agency*, com todo o tipo de informação pertinente sobre o sistema QZSS.

